

Ein System zur Analyse haptischer Eigenschaften von Benutzerschnittstellen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Dipl.-Ing. Daniel Braun

aus Bretten

Tag der mündlichen Prüfung: 18.Juli 2012

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich gerne allen Personen danken, die am Zustandekommen und Gelingen dieser Arbeit ihren Anteil hatten. An allererster Stelle steht hierbei mein Doktorvater Herr Prof. Dr. Heinz Wörn, der mir die Möglichkeit gegeben hat, über Jahre hinweg an seinem Institut zu arbeiten und schließlich meine Dissertation abzuschließen. Auch für die mir gebotenen Möglichkeiten im Forschungsbetrieb zu arbeiten und an der Lehre mitzuwirken bin ich sehr dankbar. Auch Herr Prof. Dr. Jürgen Beyerer hat mich mit seinem Interesse und der Übernahme des Zweitgutachtens sehr unterstützt. Für die entgegenkommende Zusammenarbeit möchte ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken.

Schließlich gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern, die mich schon während der Schulzeit über das Studium bis hin zu meiner Promotion jederzeit unterstützt und gefördert haben. Ihnen verdanke ich nicht nur eine große Freiheit durch diese ganze Zeit hinweg, sondern auch einen großen Teil der Motivation, diese Arbeit durchzuführen und abzuschließen. Für diese langjährige Hilfsbereitschaft und Unterstützung bin ich ihnen zu größtem Dank verpflichtet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Zielsetzung der Arbeit	10
1.3	Begriffsklärungen zur Haptik	10
1.3.1	Herkunft und Entwicklung des Begriffs „Haptik“	10
1.3.2	Die Haptik als Sinneswahrnehmung	11
2	Stand der Forschung und Technik bei der Haptikanalyse	13
2.1	Haptikanalyse in der Haptikforschung	13
2.1.1	Haptische Wahrnehmung	13
2.1.2	Haptische Messtechnik	14
2.1.3	Haptiksynthese	14
2.2	Messtechnische Haptikanalysesysteme	14
2.3	Haptiklabore im industriellen Umfeld	15
2.4	Forschungsansätze zur Haptikanalyse	15
2.5	Bewertung der Ansätze im Hinblick auf die Haptikanalyse von Benutzer- schnittstellen	18
3	Psychophysik und haptische Wahrnehmung	21
3.1	Entwicklung der Psychophysik	21
3.2	Stimulus, Reiz und Empfindung	22
3.3	Grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Psychophysik	23
3.4	Der menschliche Tastsinn	24
3.4.1	Rezeptoren und deren Charakteristik	24
3.4.2	Technische Kennwerte bei der haptischen Wahrnehmung	26
3.5	Begriffe in haptischen Systemen	27
3.6	Kategorien haptischer Eigenschaften	29
3.7	Bedeutung für die weiteren Betrachtungen	30
4	Framework für die Haptikanalyse	31
4.1	Problemstellung und Anforderungen	31
4.2	Besonderheiten bei der Haptikanalyse	32
4.3	Framework für die Analyse haptischer Eigenschaften	34
4.3.1	Grundlegende Methodik	34
4.3.2	Messvorgang für die Haptikanalyse	35
4.3.3	Haptikanalyse und Extraktion signifikanter Parameter	37

4.3.4	Synthese haptischer Eigenschaften und Rückkopplung	39
4.4	Zusammenfassung zum Framework für die Haptikanalyse	40
5	Entwicklung und Implementierung eines Haptikanalysesystems für Schalter	41
5.1	Spezialisierung der Problemstellung	42
5.1.1	Schalter als haptische Bedienelemente	42
5.1.2	Relevante Aspekte der menschlichen Wahrnehmung	43
5.2	Messsystem für die menschgeführte Haptikanalyse	44
5.2.1	Spezielle Aspekte bei der Untersuchung mit dem Menschen	44
5.2.2	Sensorik für die Kraftmessung	44
5.2.3	Positionsmesssystem für die Wegmessung	51
5.2.4	Integration von Beschleunigungssensorik	56
5.2.5	Mobiles Datenerfassungssystem	56
5.2.6	Integration der Komponenten zu einem handgeführten Sensorsystem	57
5.3	Messsystem für die technische Haptikuntersuchung	58
5.3.1	Spezielle Aspekte bei der technischen Untersuchung	58
5.3.2	Antriebssystem	60
5.3.3	Sensorik für die technische Prüfung	62
5.4	Software für die Datenerfassung	63
5.4.1	Anforderungen an die Software zur Datenerfassung	64
5.4.2	Struktur der entwickelten Softwarelösung	65
5.4.3	Komponenten des Softwaresystems zur Datenerfassung	66
5.4.4	Schnittstellen und Datenstrukturen des Softwaresystems	72
5.4.5	Zentrale Verarbeitungsschleife im Ticket Processor	73
5.4.6	Formulierung typischer Systemaufgaben als Ticket	76
5.5	Implementierung der Funktionalitäten für das Messsystem	80
5.5.1	Aufgaben der Software im Messsystem	80
5.5.2	Erstellung der Grundmodule	81
5.5.3	Kommunikationsmodule für die Verbindung	83
5.5.4	Verwendete Protokoll PlugIns	85
5.5.5	Implementierte Tickets für Messaufgaben	87
5.5.6	Ermittlung des Betätigungswegs durch Bildverarbeitung	88
5.6	Geeignete Darstellung von Messdaten	93
6	Psychophysikalisches Analysemodell	95
6.1	Erstellung eines frequenzselektiven psychophysikalischen Modells	95
6.1.1	Der Peripheral Ear Transducer (PET)	96
6.1.2	Filter des PET-Systems	97
6.1.3	Dimensionierung des PET-Systems	99
6.2	Implementierung des psychophysikalischen Modells	103
6.2.1	Fourier-t-Transformation	103
6.2.2	Digitale Berechnung des PET-Systems	106
6.2.3	Berechnung der Filter	108
6.2.4	Psychoakustische Erregung	111
6.2.5	Kalibrierung der Lautheit	112
6.3	Zusammenfassung zum psychophysikalischen Modell	114

7 Zusammenfassung und Ausblick	115
A Beschreibung der Schnittstellen des Softwaresystems	117
Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	123
Literaturverzeichnis	125

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem System zur Analyse haptischer Eigenschaften von Benutzerschnittstellen. Da die Begrifflichkeit *Haptik* grundsätzlich ein weites Feld einnimmt und auch die Analyse von Benutzerschnittstellen prinzipiell sehr verschiedene Ziele haben kann, wird im Folgenden kurz die Zielrichtung, welche diese Arbeit verfolgt vorgestellt und im Folgenden auch ein kurzer Überblick über den Begriff der Haptik gegeben. Dieser Überblick orientiert sich dabei an der grundsätzlichen Wortbedeutung und an normativen Definitionen.

1.1 Motivation

Moderne technische Geräte besitzen eine große Komplexität, sowohl was den internen Aufbau als auch die Funktionalität, für die sie eingesetzt werden können, betrifft. Auf der anderen Seite steht der menschliche Bediener, der durch eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle in die Lage versetzt werden soll, die Funktionalitäten korrekt und sicher einsetzen zu können. Das Grundproblem beim Entwurf von Mensch-Maschine-Schnittstellen besteht nun darin, dem Benutzer auf möglichst einfache Art und Weise ein Maximum der Funktionalität des technischen Geräts verfügbar zu machen. Der einfachste Ansatz hierbei ist es, Bedienelemente für alle internen Parameter und Funktionen anzubieten und den Benutzer entsprechend zu schulen. Dieser Ansatz ist allerdings nur sehr begrenzt einsetzbar: mit der Komplexität der technischen Einrichtung steigt der Schulungsaufwand enorm an und die Komplexität ist teilweise von einer einzelnen Person kaum zu erfassen, eine implizite automatische Unterstützung des Nutzers wird erschwert und vor allem ist bei vielen Geräten für Endnutzer eine Schulung auf alle einzelnen Geräte schlicht unmöglich. Ein solcher Ansatz deckt allerdings die Anforderungen vieler professionell bedienter Einrichtungen ab, die nie von ungeschulten Nutzern bedient werden, beispielsweise Industrieanlagen (bzw. Teile diese Anlagen) oder Produktionsmaschinen, die ausschließlich von Facharbeitern genutzt werden. Hier wird in der Regel sowieso eine Schulung vorgenommen, um dem Arbeiter eine optimale Nutzung zu ermöglichen. Verbesserungen sind hier allerdings auch denkbar und wünschenswert.

Ein anderer Ansatz ist die Erstellung von Nutzerführungssystemen, die explizit auf die Situation des Nutzers eingehen, situationsbezogenen Hilfen anbieten und dem Benutzer geeignete Optionen für weitere Aktionen anbieten. Diese Systeme werden bereits bei einer Vielzahl von technischen Geräten und Einrichtungen sowohl im professionellen, als auch

im Endkundensektor eingesetzt. Ein Beispiel für den Einsatz von Nutzerführungssystemen sind kontextsensitive Softwaresysteme, die je nach Nutzungssituation bestimmte weitere Optionen anbieten (z.B. Software zur Grafikbearbeitung). Auch Geräte mit einem Hardwareanteil setzen solche Ansätze ein - so ist es heute auch nicht-professionellen Fotografen möglich, eine Vielzahl von Parametern und Funktionen bei Fotokameras zu nutzen. Hier ist allerdings nicht die vollautomatische Einstellung dieser Parameter gemeint, sondern eine vom Nutzer ausgewählte sinnvolle Parametrierung, die lediglich vom System angeboten und vom Nutzer ausgewählt wird. Auch im professionellen Bereich existieren eine Vielzahl solcher Nutzerführungssysteme, beispielsweise in SCADA-Systemen, in denen kontextsensitive Handlungsempfehlungen generiert werden können oder in Expertensystemen für Kfz-Werkstätten. Allen diesen Anwendungen ist allerdings gemein, dass sie eine explizite Anfrage des Nutzers benötigen und auch die Rückkopplung an den Nutzer durch Sprache, symbolorientierte oder textuelle grafische Ausgabe geschieht. Dies bedingt, dass der Nutzer einen großen Teil seiner Aufmerksamkeit der Bedienung des Systems zuwendet.

Aus den teilweise vorhandenen Unzulänglichkeiten der beschriebenen Ansätze folgt für eine dritte Möglichkeit, dass hier der direkte physikalische Kontakt des Bedieners mit der Bedieneinrichtung genutzt werden sollte, um sowohl die Bedienungswünsche des Nutzers zu erfassen, als auch Rückkopplungen aus dem System direkt an den Nutzer zurückzugeben (vgl. V.Hayward et al. (2004)). Prinzipiell ist diese haptische Steuerung kein neuer Ansatz, dieser wird schon seit langer Zeit eingesetzt und ermöglicht es auch vergleichsweise wenig geschulten Personen, technische Geräte mit hoher Betriebsgefahr sicher und effektiv einzusetzen. Als Beispiel kann hier ein einfaches Kraftfahrzeug herangezogen werden. Dieses besitzt eine technische Komplexität die sich den allermeisten Nutzern entzieht, ist aber durch die vorhandene Nutzerschnittstelle aus Pedalen und Lenkrad nach einer vergleichsweise kurzen Schulungsphase sicher und intuitiv zu bedienen. An diesem Beispiel kann man außerdem erkennen, dass die Bedienung durch einen großen Anteil an motorischen Fähigkeiten geprägt ist. Hier kann nach der Einlernphase ohne Dialogeinrichtung oder explizite Nutzerführung intuitiv das Fahrzeug gesteuert werden. Dies hat unter anderem auch den Vorteil, dass schnelle Reaktionen des Nutzers auf Gefahrensituationen im Betrieb direkt verarbeitet werden können.

Diese einfachen haptischen Schnittstellen von Bedieneinrichtungen waren und sind oft durch eine mechanische Kopplung der Bedielemente mit den Aktoren des technischen Systems geprägt. Teilweise entspringt die Arbeitsweise der Bedielemente direkt dem mechanischen Wirkprinzip der dahinterliegenden Einrichtung - im Automobilbeispiel ist es mit einem kreisförmigen Lenkrad schlicht am einfachsten möglich, sowohl einen großen Wirkungsbereich als auch eine feinfühligere Steuerung des Lenkeinschlags zu erzeugen, die Rotationsbewegung ergibt sich aus der Art der Ansteuerung der Lenkung durch ein Lenkgetriebe. Sollen nun allerdings Assistenzsysteme zu der einfachen Kraft- und Wegübertragung durch den Nutzer hinzutreten, oder gar die direkte Wirkkette zwischen Bedieneinrichtung und Systemaktoren aufgetrennt werden (z.B. durch ein elektronisches Bremspedal), stellt sich die Frage, wie die Rückkopplung an den Nutzer auszusehen hat, damit dieser weiterhin in der Lage ist, eine Bedienung sicher und intuitiv vorzunehmen. Weitere Fragestellungen in diesem Bereich beschäftigen sich mit der Thematik, wie der Benutzer ein Gerät wahrnimmt, speziell wie dieses sich „anfühlt“. Dies ist gerade im Bereich von hochpreisigen Endkundenprodukten ein wichtiger Bestandteil des Gesamteindrucks und damit ein wesentliches Produktmerkmal.

Zum gegenwärtigen Stand der Technik werden sind auch künstlich hergestellte hap-

tische Rückkopplungen an Benutzer meist nur Größen, die möglichst genau den Rückkopplungsgrößen einer tatsächlich vorhandenen Wirkkette entsprechen. Dies ist zunächst der naheliegendste und am einfachsten realisierbare Ansatz, um eine intuitive Bedienbarkeit der Gesamteinrichtung zu erhalten. Bei aktiv angetriebenen Bedieneinrichtungen wie Steer-By-Wire-Systemen kann eine solche Rückkopplung zunächst an einer Wirkkette vermessen werden und im Anschluss von einem Aktuator abgebildet werden (ähnlich wie in einem Virtual-Reality-System). Gerade bei einfacheren Bedieneinrichtungen wie mechanischen Schaltern wird die haptische Rückkopplung über rein mechanische Elemente hergestellt. Dabei stößt man nun auf das Problem, dass es für die haptischen Merkmale eines solchen Elements und für die mechanischen Auslegungsgrößen keine gemeinsame Sprache oder Beschreibung gibt. Dies führt dazu, dass auf der einen Seite Tester als Repräsentanten von Nutzern bestimmte Anforderungen stellen und auf der anderen Seite die Hersteller der Elemente versuchen, die Anforderungen zu erfüllen. Dies ist allerdings ein langwieriger Vorgang von Versuchen und Verbesserungen, welcher nicht einem gezielten Entwurfsprozess, sondern viel mehr einem Ausprobieren entspricht.

Die Problematik in diesem Prozess hat mehrere Gründe, die im Folgenden kurz näher erläutert werden sollen. Das wichtigste Problem ist zunächst, dass der haptische Wahrnehmungsprozess beim Menschen sehr komplex ist und sich aus einer Mehrzahl von Einzelwahrnehmungen zusammensetzt. So ist die haptische Wahrnehmung ein Zusammenspiel aus einer ortsauflösenden Kraftwahrnehmung und einer Ortswahrnehmung der Bewegung während der Interaktion. Grundsätzlich kann diese Wahrnehmung allerdings auch noch durch audiovisuelle Komponenten beeinflusst werden. Dieser gesamte Prozess entzieht sich allerdings einer zerlegenden analytischen Betrachtung und ist auch vom Menschen nicht in seinen einzelnen Teilen artikulierbar, sondern nur als Wahrnehmungskomplex. Hinzu kommt nun auf der Seite der Wahrnehmung, dass grundsätzlich die Empfindungen subjektive Wahrnehmungen sind. Das heißt die wahrgenommenen Größen können durchaus sehr genau aufgelöst werden oder sind reproduzierbar, allerdings sind diese Empfindungen von Mensch zu Mensch verschieden - daher müssen haptische Wahrnehmungen prinzipiell gegenüber Referenzwahrnehmungen betrachtet werden. Auf der Seite von technischen Untersuchungen kommen weitere Probleme hinzu: es ist nicht von vornherein klar, welche Größen betrachtet werden müssen und die notwendige Genauigkeit der Aufzeichnung bzw. Wiedergabe ist ebenfalls nicht bekannt. Durch das Vorhandensein von Rückkopplungseffekten kann sich das Verhalten eines haptischen Bedienelements auch bei verschiedenen Messprozeduren ändern. Eher eine Randproblematik ist noch durch den Umstand gegeben, dass eine gemeinsame Sprache schon zu den Begriffen *Haptik*, *Haptikanalyse* und *Haptiksimulation* nur wenig vorhanden ist, dies bezieht sich sowohl auf die genannten Begriffe als auch auf die Merkmale, welche bei der Haptikanalyse überhaupt betrachtet werden sollen.

Zusammenfassend kann man also festhalten, dass zum einen gezielt eingesetzte haptische Bedienelemente einen großen Vorteil beim Einsatz in Benutzerschnittstellen haben können und die Benutzung von technischen Geräten bedeutend erleichtern können. Zum anderen wird aber der Entwurf von geeigneten Elementen oder Rückkopplungssignalen dadurch behindert, dass zwischen einem gewünschten Verhalten und den technischen Parametern sowohl eine Beschreibung als auch Systeme zur Untersuchung bisher in weiten Bereichen fehlen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll ein System beschreiben, welches eine nachvollziehbare Untersuchung und Analyse der haptischen Eigenschaften von Benutzerschnittstellen ermöglicht. Die gewonnenen Informationen sollen dann dazu dienen, den zielgerichteten Entwurf von haptischen Bedienelementen zu unterstützen. Ein technisches System, welches haptische Bedienelemente als Teile von Benutzerschnittstellen untersuchen kann und diesen reproduzierbar Merkmale zuweisen kann wäre für den Entwurf ein deutlicher Fortschritt, da hiermit objektivierbare Untersuchungsergebnisse vorliegen, die auch hinterher wieder zur Bewertung von Bedienelementen herangezogen werden können. Darüber hinaus ermöglicht ein solches System die Analyse von haptischen Systemen, die noch nicht physikalisch vorliegen, sondern deren mechanische Eigenschaften lediglich als Spezifikation oder Ergebnis einer Simulation vorliegen. Durch diese Möglichkeit würde die zeitraubende Schleife zwischen Entwurf, Prototypenherstellung und anschließender Bewertung deutlich abgekürzt. Die Herstellung von Beziehungen zwischen menschlichen Empfindungen auf der einen Seite und technischen Größen auf der anderen Seite wäre für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungsfeldern von Interesse - angefangen vom naheliegenden Feld der Erforschung intuitiver Nutzerschnittstellen, über künstliche und erweiterte Realität bis hin zu dem Gebiet der Mensch-Roboter-Kooperation und der Service- bzw. Assistenzrobotik.

1.3 Begriffsklärungen zur Haptik

Für den weiteren Verlauf es wichtig, einige Begriffe aus dem Gebiet der Haptik und Haptikanalyse zu klären. Auf diesem Weg soll dem schon eingangs beschriebenen Problem entgegengewirkt werden, dass eine gemeinsame Sprache zu den verschiedenen Teilgebieten und Problemstellungen oft fehlt oder einfach ein unterschiedliches Verständnis der verschiedenen Begrifflichkeiten vorliegt.

1.3.1 Herkunft und Entwicklung des Begriffs „Haptik“

Der Begriff „Haptik“ ist vom griechischen „haptios“ abgeleitet und beschreibt dementsprechend etwas Greifbares oder etwas Tastbares. In der Verwendung hat dieser Begriff über die Zeit allerdings eine gewisse Bedeutungswandlung erfahren, auch seine Wichtigkeit für die Untersuchung in Wissenschaft und Technik nahm über die Zeit zu. In der klassischen Aufzählung der Sinne durch Aristoteles wird beispielsweise der Tastsinn und damit auch die Haptik erst an fünfter Stelle nach allen anderen Sinnen, nämlich dem Gesichtssinn und dem Hörsinn sowie dem Geruchssinn und dem Geschmackssinn, angesiedelt (Kern (2009)). Allerdings war die große Bedeutung des Tastsinnes für die gesamte Wahrnehmung des Menschen auch stets Gegenstand der Betrachtung.

Allerdings trifft die Gleichsetzung der Haptik mit dem Tastsinn den Charakter des Begriffs nicht ganz, vielmehr vereint die Haptik verschiedene Bereiche der Wahrnehmung. Hauptsächlich verbindet sie den Bewegungssinn und den Tastsinn zu einer komplexeren Wahrnehmung. So ist auch nicht nur die menschliche Hand für den haptischen Sinn relevant, sondern der gesamte Hautsinn, der sich vollständig über den Körper des Menschen erstreckt. Zusätzlich gehen auch Wahrnehmungen aus dem Bewegungsapparat in die Wahrnehmung der Haptik ein, wie zum Beispiel aufzuwendende Gegenkräfte oder die

Stellungen von Gliedmaßen.

Im heutigen Gebrauch kommen der Haptik prinzipiell verschiedene Bedeutungen zu, die alle um den Tastsinn und die Interaktion den Menschen mit Objekten herum angesiedelt sind. Zunächst definiert beispielsweise ISO-Norm 9241-910 folgendermaßen:

Haptik, haptische Wahrnehmung sensorische und/oder motorische Aktivität, die in der Haut, in den Muskeln, Gelenken und Sehnen begründet ist.

Diese sehr grundlegende Definition umfasst alle wesentlichen Punkte, die bei der Haptik eine Rolle spielen: zum einen wird hier Begriff der Aktivität genannt, das heißt es existiert keine haptische Wahrnehmung ohne eine Aktivität des Menschen oder einer Benutzerschnittstelle zwischen technischer Einrichtung und dem Menschen. Zum anderen werden auch alle an der haptischen Wahrnehmung beteiligten Körperteile in der Definition vereint.

1.3.2 Die Haptik als Sinneswahrnehmung

Wie bereits in 1.3.1 beschrieben ist die Haptik eine komplexe Wahrnehmung, die verschiedene Sinnesreize in sich vereint. In Erweiterung der fünf klassischen Sinne sollen nun die einzelnen Modalitäten der Wahrnehmung noch einmal genauer betrachtet werden.

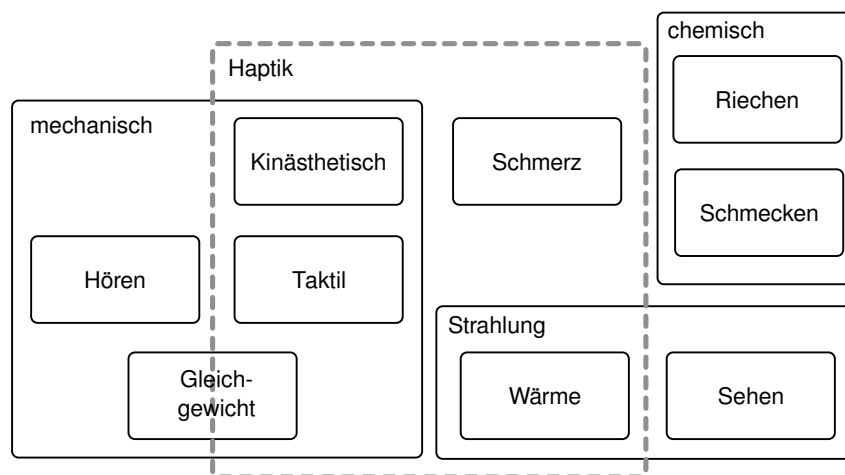


Abbildung 1.1: Der haptische Sinn in seinen Einzelsinnen

In Abbildung 1.1 ist eine feinere Aufteilung der menschlichen Sinne skizziert, die auch eine Einteilung der verschiedenen Sinne in einzelne Wirkprinzipien darstellt. So sind der Geschmacks- und Geruchssinn Sinne, die auf chemische Reize reagieren, der Sehsinn und das Wärmeempfinden reagieren auf Strahlung verschiedener Wellenlängen und die restlichen Einzelsinne Hörsinn, Gleichgewichtssinn sowie der taktile und kinästhetische Sinn dienen der Wahrnehmung mechanischer Größen. Eine Sonderstellung nimmt der Schmerzsinne ein, dieser ist nicht an ein bestimmtes Wirkprinzip gekoppelt, sondern signalisiert in den meisten Fällen eine Überlastung der anderen Sinne, so kann Schmerz sowohl in der Temperaturwahrnehmung als auch in der taktilen Wahrnehmung auftreten.

Die haptische Wahrnehmung setzt sich nun ausgehend von der genannten Definition aus den Einzelwahrnehmungen zusammen, die mit dem Bewegungsapparat und mechanischen

Einwirkungen auf den Menschen durch seine Umwelt verknüpft sind. An dieser Stelle sind noch zwei weitere Sinne zu definieren, der taktile Sinn und der kinästhetische Sinn. An dieser Stelle definiert die Norm ISO 9214-910:

taktil zur Berührung gehörend

kinästhetisch zur Kinästhesie gehörend

Kinästhesie auf den Muskeln, Gelenken und Sehnen beruhende Empfindungsfähigkeit und motorische Aktivität

Damit erfasst die taktile Wahrnehmung mechanische Interaktionen mit der menschlichen Haut, allerdings wird hier nicht auf die physikalischen Größen eingegangen, die mit einer solchen Berührung einhergehen. Da diese Definition aber auch Berührungen der Haut, beispielsweise durch Flüssigkeiten, welche extrem schwer mit physikalischen Größen zu beschreiben sind, wird im Rahmen dieser Arbeit die taktile Wahrnehmung folgendermaßen definiert:

taktile Wahrnehmung Wahrnehmung von Berührungen über einwirkende Kräfte, Momente und deren Einwirkungsort

Diese Definition schränkt zwar die Allgemeinheit an dieser Stelle ein, ist allerdings für die Betrachtung haptischer Eigenschaften von Benutzerschnittstellen zweckmäßig, da hier der mechanische Kontakt durch eben diese Größen gekennzeichnet ist. Die kinästhetische Wahrnehmung ist eine Wahrnehmung, die durch veränderliche Positionen, Winkel, Kräfte und Momente im Bewegungsapparat gekennzeichnet ist. Aus den Definitionen folgt auch, dass jede kinästhetische Interaktion des Menschen mit Objekten seiner Umgebung mit einer taktilen Komponente verbunden und somit auch als haptische Interaktion betrachtbar ist. Allerdings macht dies nicht jedes Objekt zu einer haptischen Schnittstelle (siehe Kern (2009)).

Mit den so vorliegenden Definitionen und der Zielsetzung können nun im folgenden Kapitel der Stand in Forschung und Technik analysiert und im Hinblick auf Eignung in einem angestrebten Analysesystem für haptische Eigenschaften untersucht werden. Eine Vertiefung der hier vorgenommenen Betrachtungen der Haptik selbst und von haptischen Eigenschaften folgt dann im Anschluss in Kapitel 3, bevor das Framework für die Haptikanalyse und eine Implementierung eines Analysesystems vorgestellt werden.

Kapitel 2

Stand der Forschung und Technik bei der Haptikanalyse

Für die Entwicklung eines Haptikanalysesystems wurde zunächst der Stand der Forschung in diesem Gebiet untersucht, um Möglichkeiten zu finden, diese gestellte Aufgabe mit bekannten Methoden zu lösen. Ähnlich motiviert ist die Untersuchung des Stands der Technik, um Konzepte oder auch Geräte zu finden, welche die Zusammenstellung eines Analysesystems vereinfachen oder bereits lösen. Zunächst wird daher im Folgenden noch einmal das Gebiet der Haptikforschung allgemein beleuchtet, um die verschiedenen Einsatzgebiete der Haptikanalyse identifizieren zu können und vorhandene Lösungen betrachten zu können. Im Anschluss werden einige Ansätze für die Haptikanalyse speziell bei Benutzerschnittstellen vorgestellt, die bereits erforscht wurden oder sich im Einsatz befinden. Diese bestehenden Ansätze werden untersucht und die Anwendbarkeit für die Aufgabenstellung bewertet.

2.1 Haptikanalyse in der Haptikforschung

Das Gebiet der Haptikforschung erstreckt sich über verschiedene Fachgebiete von der mechanischen Untersuchung und Modellierung im maschinenbaulichen Bereich über die Beschäftigung mit Antriebskonzepten und den damit verbundenen Algorithmen in der Elektrotechnik und Informatik, bis hin zu den verschiedenen Gebieten der Neurobiologie, Physiologie und Psychologie. Grundsätzlich wird die Forschung in den einzelnen Teilgebieten von verschiedenen Interessengruppen getrieben. Allerdings sind die einzelnen Gebiete nicht streng von einander getrennt, die Grenzen verlaufen eher fließend. Die Haptikforschung selbst lässt sich in die Beschäftigung mit drei grundsätzlichen Themen unterteilen: die Erforschung der haptischen Wahrnehmung, die Entwicklung haptischer Messtechnik und die Entwicklungen von Methoden zur haptischen Synthese.

2.1.1 Haptische Wahrnehmung

Die Erforschung der haptischen Wahrnehmung beschäftigt sich unter einer wissenschaftlichen Vorgehensweise mit den Zusammenhängen von physikalisch messbaren Größen der Umwelt und deren Umsetzung in subjektive menschliche Empfindungen. Dabei kommen

sowohl Methoden der Psychophysik als auch der Neurobiologie zum Einsatz. In diesem Umfeld ist die Haptikanalyse zum Einen Gegenstand der Untersuchung selbst, da sie ja eben versucht, die haptischen Eigenschaften von Gegenständen, mit denen der Mensch interagiert, herauszufinden. Zum Anderen wird die Haptikanalyse aber auch dazu verwendet, Hypothesen zu überprüfen und wenn möglich zu verifizieren. Die Erforschung der haptischen Wahrnehmung ist der Grundlagenforschung zuzuordnen.

2.1.2 Haptische Messtechnik

Bei der Entwicklung haptischer Messtechnik, wird in einem service-orientierten Umfeld nach Methoden und Einrichtungen gesucht, mit denen sich die verschiedenen physikalischen Größen, die für die Haptik eine Rolle spielen, vermessen werden können. Hier werden beispielsweise neue Systeme für die Kraft- und Schwingungsmessung entwickelt. Des Weiteren kann untersucht werden, inwiefern sich Untersuchungsprozeduren, oder die Messtechnik und die erfassten Größen selbst normen lassen und so eine gesicherte Grundlage für das weitere Vorgehen bieten können. In diesem Gebiet ist die Haptikanalyse insofern auch Gegenstand der Untersuchung, da jedes Haptikanalysesystem auch zu einem großen Teil ein Messsystem für physikalische Größen ist. Nur durch die vorherige Ermittlung von Messgrößen kann ein Zusammenhang zwischen eben diesen Größen und menschlichen Empfindungen hergestellt werden.

2.1.3 Haptiksynthese

Auch in der angewandten Forschung zur haptischen Synthese sind Haptikanalysesysteme ein wichtiger Bestandteil. Bei der haptischen Synthese steht nämlich die Erzeugung haptischer Eigenschaften durch passend gewählte Geräte oder Einrichtungen im Vordergrund. Dieses Gebiet beschäftigt sich unter Anderen mit den Fragestellungen, durch welche Methoden virtuelle Realitäten geschaffen werden können, oder wie Benutzerschnittstellen für die Telemanipulation beschaffen sein müssen. In beiden Fällen soll dem Menschen als Anwender über die Haptik ein Eindruck von Objekten oder einer Umwelt vermittelt werden, in der er sich zum diesem Zeitpunkt nicht befindet. Die Haptikanalyse leistet hier einen Beitrag bei der Untersuchung von realen Objekten und deren Eigenschaften. Diese Eigenschaften können dann möglichst durch die haptische Synthese abgebildet werden.

Aus diesen Erläuterungen heraus lässt sich nun zum Einen die Haptikanalyse selbst charakterisieren und zum Anderen aber auch die verschiedenen Gebiete eingrenzen, in denen nach passenden Herangehensweisen für die Lösung der Analyseaufgabe gesucht werden kann.

2.2 Messtechnische Haptikanalysesysteme

Ein grundlegender Aspekt bei der Haptikanalyse ist die Aufzeichnung von Messdaten an einer Benutzerschnittstelle, die wiederum in den meisten Fällen aus mehreren einzelnen Bedienelementen besteht. Typischerweise sind in Benutzerschnittstellen haptische Elemente enthalten, die sich bewegen lassen. Dies ist keine Selbstverständlichkeit, nach den Definitionen in 3.5 können durchaus auch völlig starre Objekte mit gewissen Oberflächeneigenschaften bereits als haptische Geräte betrachtet werden. Allerdings ist bei diesen nur eine Informationsvermittlung vom Objekt zum Nutzer vorgesehen und da genau

diese Information beim Entwurf des Objekts das Entwurfsziel war, ist eine Untersuchung von zusätzlichen Eigenschaften in der Regel nicht Gegenstand einer messtechnischen Haptikanalyse.

Typischerweise handelt es sich bei den messtechnischen Haptikanalysesystemen um Messmaschinen, die für eine bestimmte haptische Schnittstelle entworfen und gebaut werden. Durch rekonfigurierbare Messmaschinen können auch unterschiedliche Klassen von haptischen Schnittstellen untersucht werden. Bei der messtechnischen Untersuchung wird nun meist folgendermaßen vorgegangen: das haptische Bedienelement wird von der Messmaschine über seinen gesamten Bewegungsbereich geführt und dabei werden die auftretenden Kräfte und Momente erfasst. Ergebnis einer solchen messtechnischen Haptikanalyse ist ein Prüfprotokoll, welches Verläufe von Kräften und Momenten über dem zurückgelegten Weg abbildet.

Das grundsätzliche Problem bei einer solchen Vorgehensweise ist, dass sie lediglich die haptischen Bedienelemente oder die haptische Benutzerschnittstelle als technisches System betrachtet, welches eine gewisse mechanische Impedanz aufweist. Dadurch können zwar die technischen Eigenschaften des Systems charakterisiert werden, eine Betrachtung des menschlichen Wahrnehmungsprozesses findet dabei im Allgemeinen aber nicht statt und ist auch nicht Ziel der Untersuchungen.

2.3 Haptiklabore im industriellen Umfeld

Im Umfeld der, für den Endkunden produzierenden, Industrie wird auch oft von sogenannten *Haptiklaboren* gesprochen, wenn die Haptikanalyse adressiert wird. In einem solchen Haptiklabor werden dann komplexere haptische Emfindungen, die ein Mensch bei der Interaktion mit den verschiedenen Produkten hat, untersucht. Dabei ist das Ziel die Optimierung der Produkte im Hinblick auf ein bestimmtes Gefühl, das der Mensch bei der Interaktion mit diesem Produkt erwartet.

In einem Kraftfahrzeug beispielsweise befinden sich in der Nutzerschnittstelle, also der Fahrgastzelle, eine Vielzahl von haptischen Bedienelementen, denen haptische Eigenschaften über die Empfindungen zugeordnet werden können. Diese Eigenschaften werden dann am fertigen Produkt oder sogenannten Mock-Ups, also einer probeweisen Integration von verschiedenen Elementen zu einem Funktionsmuster, untersucht. Ziel der Untersuchungen in diesem Fall ist die Auswahl und die Spezifikation geeigneter Komponenten, die einem potenziellen Nutzer die sichere Bedienung ermöglichen und auch den Nutzer als Kunden zufrieden stellen. Daneben können auch mögliche aktive Hilfen, wie im Beispiel des Kraftfahrzeugs Fahrassistenzsysteme, untersucht und weiterentwickelt werden.

2.4 Forschungsansätze zur Haptikanalyse

In der Forschung existieren die verschiedensten Ansätze zur Haptikanalyse, allerdings ist die tatsächliche Analyse haptischer Eigenschaften meist nur am Rande von Interesse. Die haptischen Eigenschaften von Objekten werden so als Standard für simulierte Objekte oder manipulierte Objekte bei Telemanipulationssystemen betrachtet. Allerdings existieren auch einige Ansätze, die sich gezielt mit Bedienoberflächen oder sogar Schaltern beschäftigen. Diese werden im Folgenden genauer betrachtet.

Bei MacLean (1996) wird beispielsweise ein Verfahren beschrieben, welches eine aktive haptische Sonde verwendet, um mit realen Objekten zu interagieren. Das Ziel ist es, ein Modell für die Wiedergabe von realen Objekteigenschaften zu gewinnen. Im Sinne der Untersuchung eines haptischen Objekts (vgl. 3.5) kann dieses System bereits als Haptikanalysesystem bezeichnet werden. Allerdings wird in dieser zitierten Arbeit versucht, eine Modellierung für die mechanischen Größen bei der Interaktion zu gewinnen, damit diese hinterher auf einer Simulationseinrichtung mit hoher Qualität wiedergegeben werden können. Der Vorteil bei einer aktiven Vermessung eines unbekanntes Objekts liegt darin, dass nicht Fehler bei einer rein theoretischen Modellierung zu einer schlechteren Wiedergabe im weiteren Verlauf führen.

Eine weitere Objekteigenschaft, bei der haptischen Interaktion eine Rolle spielt wird durch Richard (2000) untersucht. Wie bei der vorhergehenden Arbeit wird zunächst ein vereinfachtes Modell eines bestimmten Effekts, in diesem Fall der Oberflächenreibung erstellt und dann durch ein Identifikationsverfahren aus den, bei Exploration und Vermessung gewonnenen, Daten Erkenntnisse über die Modellparameter abzuleiten. Ein Hauptziel der dieser Arbeit ist es auch, Reibungseffekte in Systemen der virtuellen Realität, bzw. der Haptiksynthese abzubilden.

Ein weiterer Schritt in der mechanisierten Analyse von Systemen wird von und R. Brent Gillespie (2003) unternommen, in diesem Fall sollen nun nicht mehr einzelne Effekte bei der haptischen Interaktion analysiert werden, das Ziel ist viel mehr die Parameteridentifikation eines hybriden Systems. Die Verwendung eines hybriden Systems verspricht den Autoren zu Folge eine höhere Güte der Modellierung in vielen Fällen, da die Modellierung als einfaches dynamisches System an Zustandübergängen prinzipiell auf Probleme stößt. Ein weiteres Kennzeichen dieser Arbeit ist auch, dass die Exploration des Objekts automatisiert geschieht und auch die Modellbildung, im Fall der Veröffentlichung die Parameterbestimmung, geschieht automatisch.

In Hayward and MacLean (2007) wird mehr allgemein das Gebiet der Haptik und spezieller des haptischen Feedbacks und des Force-Feedbacks betrachtet. Allerdings werden in dieser Veröffentlichung auch interessante Regeln für Messungen und Interaktionen an haptischen Schnittstellen aufgestellt. Die Regeln betreffen die Art und Weise, wie sich ein System verhalten können muss, dass ein überzeugendes haptisches Feedback an den Nutzer liefern kann. Diese Regeln umfassen unter anderem auch die Forderung nach ausreichender Kapazität von verwendeten Sensoren und die sichere Einkopplung des Nutzers als Last. Die Arbeit steht zwar im eigentlichen Sinne der Haptikanalyse etwas ferner, allerdings kann man im Umkehrschluss für Haptikanalysesysteme auch festhalten, dass hier ähnliche Regeln gelten sollten wie für haptische Wiedergabegeräte, nur eben auf der anderen Seite der Schnittstelle. Im Falle des haptischen Feedbacks ist nämlich der Mensch das Haptikanalysegerät. Wenn nun ein technisches System für die Haptikanalyse eingesetzt werden soll, dann müsste es zumindest die selben Aufnahmefähigkeiten wie ein überzeugender Haptiksimulator haben.

Bei Choi and Tan (2004) werden Untersuchungen virtueller Oberflächen und deren haptischer Eigenschaften vorgestellt. Dies ist aus dem selben Grund interessant, wie die vorher genannte Arbeit, da hier Aussagen darüber gemacht werden, welche Anforderungen mindestens an die technische Wiedergabe haptischer Eigenschaften gestellt werden müssen, damit dem Nutzer eine überzeugende Wahrnehmung vermittelt werden kann. Allerdings wird hier auch auf die Bildung von Kennzahlen und Werten eingegangen. Diese könnten wiederum im Umkehrschluss auch Aussagen darüber ermöglichen, welche Anforderungen

an ein Haptikanalysesystem gestellt werden müssen, damit es prinzipiell in der Lage ist, mit der Wahrnehmung des Menschen vergleichbar zu sein.

Die Betrachtung von multisensoriellen Daten für die Erfassung haptischer Eigenschaften wird durch Kuchenbecker (2008) adressiert. Die zu Grunde liegende Methodik wird von der Autorin als *Haptography* bezeichnet. Besonders interessant an der Vorgehensweise ist der Ansatz, die Erfassung der Daten nicht auf einer einfachen Messung von Kräften und Wegen basieren zu lassen, sondern durch eine hochkomplexe ganzheitliche Betrachtung der verschiedensten Modalitäten, die den menschlichen Sinnen entsprechen. Die Erfassung wird in Kuchenbecker et al. (2009) auch weiter detailliert beschrieben, hier unter der Verwendung von maximal vielen sensorischen Modalitäten bei der Untersuchung von Objekten durch den Menschen mit einem sensorbestückten Tool. Diese Vorgehensweise verschiebt zwar die Wahrnehmung des Menschen im Normalfall erheblich, allerdings ist dies für den Kontext der vorgestellten Arbeit weniger relevant, da hier auch auf eine Wiedergabe der aufgenommenen haptischen „Bilder“ mit einem Haptiksimulator mit einem Stiftinterface (SensAble Phantom) abgezielt wird. Die Analogie der Begrifflichkeit zur „Photographie“ ist bei der genannten Arbeit durchaus kein Zufall, sondern wird auch von der Autorin zitiert.

Die Arbeit von Pai and Rizun (2003) stellt im Vergleich zu der vorangenannten Arbeit einen Rückschritt in Beziehung auf die Anzahl der gemessenen Größen und das Messvermögen dar. Allerdings wird mit dieser Arbeit ein sehr interessantes Konzept verfolgt, es wird nämlich die Frage aufgeworfen, wie es möglich ist, ein System zur Haptikanalyse möglichst so zu gestalten, dass für die Datenerfassung kein Messlabor oder mehr noch die Bildung eines kleinen Ausschnitts aus der tatsächlichen Realität nötig ist. Die Frage beantworten die Autoren mit der Vorstellung des sogenannten *WHaT*, dem Wireless Haptic Texture Sensor (Abbildung 2.1).

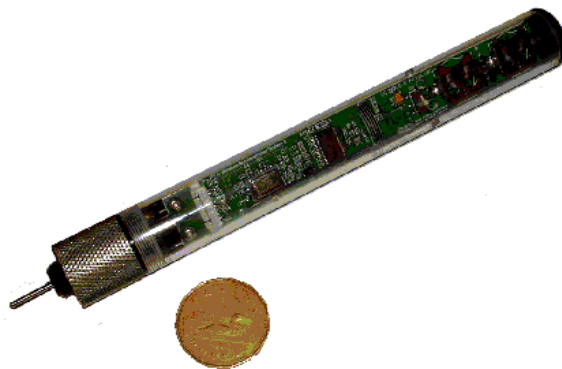


Abbildung 2.1: Der WHaT (Wireless Haptic Texture Sensor) nach Pai and Rizun (2003)

Dieses drahtlose Erfassungssystem vereint einen Kraftsensor in der Spitze mit mehreren Beschleunigungssensoren im Inneren des Geräts. Dabei ist das Gerät selbst nicht größer als ein normaler Stift und kann von einer Person beliebig im Raum und über Oberflächen geführt werden. Gedacht ist das vorgestellte System für die Analyse der haptischen Textur eines Objekts, also der Objekt Oberfläche. Dies macht zwar die Anwendung für die Aufgabenstellung der Analyse von Benutzerschnittstellen weniger geeignet, da hier nicht nur Oberflächenmerkmale betrachtet werden, aber die Idee eines kleinen leichten Systems für die Datenaufzeichnung bleibt weiterhin attraktiv, vor allem, weil dadurch auch der Mensch nicht nur weniger eingeschränkt, sondern auch weniger beeinflusst wird.

Die von D.Weir et al. (2004) vorgestellten „haptic profiles“ stellen am ehesten eine Art Lösung für die Haptikanalyse von Benutzerschnittstellen dar. In der Arbeit zu diesen graphischen Darstellungen werden mehrere interessante Punkte aufgeworfen. Zum Einen wird die Untersuchung nicht alleine von einer Maschine durchgeführt, sondern die Untersuchungseinrichtung wird durch den menschlichen Nutzer aktuiert. Zum Anderen werden aus den gewonnenen Daten (Betätigungskraft, Geschwindigkeit und Position) im Anschluss dreidimensionale Darstellungen (siehe Abb. 2.2) erstellt, die nach weiteren Gesichtspunkten, wie der dem Betrag der Beschleunigung bei der Bewegung, eingefärbt werden.

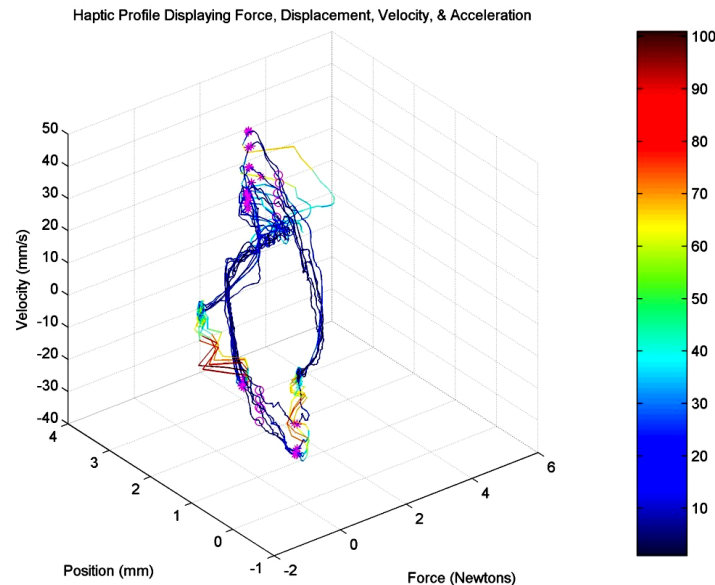


Abbildung 2.2: Ein *haptic profile* nach D.Weir et al. (2004)

Die Form dieser Darstellungen wird nun direkt mit menschlichen Aussagen über das Verhalten eines Schalters in Verbindung gesetzt. Insofern sind viele wesentliche Gesichtspunkte bei dieser Arbeit angeschnitten. Allerdings wird zwischen der Gestalt der Darstellung und den menschlichen Aussagen keine rechnerische Beziehung hergestellt oder gewisse Kennwerte extrahiert, die auf die menschlichen Wahrnehmungsgrößen schließen lassen könnten. Daher bleibt an dieser Stelle eine schwer zu schließende Lücke, die durch die neue Art der Analyse in graphischer Form auch nur schwer durch aus den anderen Ansätzen bekannte Ansätze zu behandeln ist. Es bleiben die Methodik der menschlichen Aktuierung in Verbindung mit einer Messung als sehr vielversprechendes Prinzip für die Haptikanalyse.

2.5 Bewertung der Ansätze im Hinblick auf die Haptikanalyse von Benutzerschnittstellen

Die vorgestellten Ausprägungen der Haptikanalyse in der Technik und die Forschungsansätze auf dem selben Gebiet zeigen, dass trotz einer langen Entwicklung in der Messtechnik und auch der Erforschung und Implementierung neuer Methoden in der Forschung immer noch ein Mangel an Haptikanalysesystemen besteht, die tatsächlich darauf ausgerichtet sind, die haptischen Eigenschaften von Benutzerschnittstellen inklusive der menschlichen

2.5 Bewertung der Ansätze im Hinblick auf die Haptikanalyse von Benutzerschnittstellen

Wahrnehmungen zu erfassen und durch eine Analyse der einzelnen Modalitäten zueinander in ein Verhältnis zu setzen. Dieses Verhältnis soll nicht nur bei einzelnen Experimenten nach einer Auswertungen und Zuordnung gelten, sondern es soll einen allgemeingültigeren Charakter zumindest für ähnliche betrachtete haptische Systeme haben.

Das Problem besteht darin, dass viele Untersuchungen bei der Haptikanalyse darauf ausgelegt sind, entweder nur technische Kenngrößen aus einem untersuchten Objekt zu extrahieren oder dass sie darauf abzielen, ein vorher erstelltes Modell zu parametrisieren und mit Hilfe des Modells hinterher das haptische Verhalten des Objekts zu simulieren. Daher ist eine genauere Betrachtung der Psychophysik und der haptischen Wahrnehmung nötig, um daraus eine Methodik und Systeme abzuleiten, welche die gewünschten Verbindungen herstellen können.

Kapitel 3

Psychophysik und haptische Wahrnehmung

Die Grundlage eines Haptikanalysesystems bildet notwendigerweise die Disziplin der Psychophysik. Diese Wissenschaftsdisziplin beschäftigt sich allgemein mit den Zusammenhängen, die zwischen den physikalischen Größen auf der einen Seite und dem inneren Erleben der Umwelt durch den Menschen auf der anderen Seite, bestehen. Das folgende Kapitel gibt hier einen Einblick in die Grundlagen der Psychophysik und wendet sich dann dem menschlichen Tastsinn zu, welcher die menschliche Empfindung darstellt, die den haptischen Sinn des Menschen maßgeblich prägt. Auch die verschiedenen Begrifflichkeiten in der Haptik werden hier weiter ausgeführt und ein Überblick über Kategorien haptischer Empfindungen gegeben.

3.1 Entwicklung der Psychophysik

Die Psychophysik untersucht als Wissenschaftsdisziplin den Zusammenhang zwischen dem menschlichen Erleben einer Wahrnehmung und den physikalisch messbaren Größen, die mit der Wahrnehmung zusammenhängen. Dabei wird versucht, die Wechselbeziehungen zwischen den prinzipiell subjektiven Wahrnehmungen des Menschen und den objektivierbaren physikalischen Größen durch Gesetzmäßigkeiten zu beschreiben. Die Betrachtung der menschlichen Wahrnehmung entwickelte sich dabei über die Zeit von einem Gebiet der Philosophie und später der Psychologie hin zu ihrer heutigen Stellung als kognitionswissenschaftliche Disziplin. Als Begründer der modernen Psychophysik kann Gustav Theodor Fechner betrachtet werden, der dieses Gebiet im ausgehenden 19. Jahrhundert durch sein Werk *Elemente der Psychophysik* (Fechner (1860)) beschrieben hat. So definiert Fechner:

Begriff und Aufgabe der Psychophysik Unter Psychophysik soll hier eine exakte Lehre von den funktionellen oder Abhängigkeitsbeziehungen zwischen Körper und Seele, allgemeiner zwischen körperlicher und geistiger, physischer und psychischer Welt verstanden werden.

Diese Definition legt die Psychophysik als exakte, beschreibende Wissenschaft fest, die neben den Erklärungen der verschiedenen Beziehungen zwischen dem menschlichen Empfinden und dem Zustand seiner Umwelt auch eine Formulierung von berechenbaren Ge-

setzmäßigkeiten anstrebt. Dabei trifft Fechner auch eine Aufteilung der untersuchten Wechselbeziehungen in die *äußere* und *innere Psychophysik* sowie die *Physiologie*. Die äußere Psychophysik beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen dem physikalischen Stimulus, der auf den Menschen einwirkt und dem inneren Erleben, also der Empfindung, welche der Mensch mit diesem Erlebnis verbindet. Dieser direkte Zusammenhang wird durch die Gebiete der Physiologie und der inneren Psychophysik noch einmal unterteilt in die Betrachtung, wie ein physikalischer Stimulus mit der Reizung bestimmter Nerven zusammenhängt. Die Physiologie ist ein Teilgebiet der Biologie und beschreibt für sich genommen physikalische und chemische Vorgänge in organischem Gewebe und betrachtet auch die Wechselwirkung der verschiedenen Prozesse im Gesamtorganismus. Die Umformung von neuronalen Prozessen, die als Ergebnis der physiologischen Untersuchung vorliegen, in menschliche Empfindungen werden durch die innere Psychophysik untersucht. Die innere Psychophysik ist daher ein Teil der kognitiven Neurowissenschaften, welche sich allgemein mit den neuronalen Prozessen beschäftigen, die bei der menschlichen Kognition eine Rolle spielen.

3.2 Stimulus, Reiz und Empfindung

Für die weitere Betrachtung müssen noch die Begriffe *Stimulus*, *Reiz* und *Empfindung* kurz erläutert werden. Im Prinzip stehen diese drei Begriffe in der Kette menschlichen Wahrnehmung hintereinander. Der physikalische Stimulus bezeichnet das zu Grunde liegende physikalische Wirkprinzip und die beteiligten messbaren Größen. Dabei ist festzuhalten, dass der Stimulus nicht unbedingt direkt mit einem wahrgenommenen Effekt zusammenhängen muss. Im Allgemeinen können auch mehrere Stimuli zusammengefasst zu einer einzelnen Wahrnehmung führen. Ein Beispiel für einen Stimulus ist beispielsweise Licht mit einer bestimmten Wellenlänge, das auf das menschliche Auge trifft. Messbar sind bei diesem Stimulus die Intensität und das Spektrum der vorkommenden Wellenlängen. Der Mensch nimmt allerdings nicht die Wellenlängen einzeln wahr oder besitzt die Fähigkeit, eine Spektralanalyse des einfallenden Lichts durchzuführen, stattdessen kommt es zu einer Farbwahrnehmung. Diese hängt zwar mit den messbaren Größen zusammen, allerdings sind die Beziehungen, welche die äußere Psychophysik betrachten muss, in diesem Fall komplexer als eine einfache Abbildung und Skalierung der gemessenen Größen.

Der wahrgenommene Reiz ist schließlich der Aspekt, den der Mensch von einem auftretenden physikalischen Effekt wahrnimmt. Die Reize können durch Abbildung und Verknüpfung verschiedener physikalischer Stimuli entstehen. Wird nun diese Verknüpfung von gemessenen Werten zu einem Reiz berechnet und mit der Wahrnehmung des Menschen durch Befragung und Auswertung verglichen, so können Gesetzmäßigkeiten für die äußere Psychophysik ermittelt werden.

Die Empfindungen bilden schließlich die vom Menschen erlebte Realität. Sie können sich aus verschiedenen wahrgenommenen Reizen zusammensetzen oder auch aus einzelnen Reizen gebildet werden. Gekennzeichnet sind die Empfindungen durch das subjektive Erleben durch jeden Menschen und dadurch, dass sie somit einer objektiven Bestimmung im Sinne einer physikalischen Messung nicht zugänglich sind. Allerdings darf die Subjektivität an dieser Stelle nicht mit einer Ungenauigkeit der Wahrnehmung verwechselt werden. Ein einzelner Mensch kann sehr feine Unterschiede in der Wahrnehmung auflösen und auch die Wiedererkennungsfähigkeit einer bestimmten Reizstärke ist sehr hoch. Lediglich die ver-

schiedenen Wahrnehmungsschwellen und der Zusammenhang zwischen Reizstärke und Empfindungsstärke sind durch die Subjektivität von Mensch zu Mensch verschieden.

3.3 Grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Psychophysik

Die Psychophysik unterscheidet bei der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Reizen und Empfindungen prinzipiell zwei Schwellwerte. Zum Einen sind dies die absoluten Schwellwerte, sie stellen die untere Grenze der Reizstärke R dar, die durch die Wahrnehmung gerade noch aufgenommen werden kann. Diese untere Schwelle lässt sich meist durch vergleichsweise einfache Experimente bestimmen, in denen der Reiz Schritt für Schritt verkleinert wird, bis keine Wahrnehmung mehr möglich ist. Die absolute Schwelle für einen bestimmten Reiz kann von Mensch zu Mensch variieren und ist auch über die Lebensdauer des Menschen nicht konstant.

Der zweite Schwellwert ist die sogenannte *Just Notable Difference (JND)* ΔR . Sie gibt an, wie groß der Unterschied zwischen zwei Reizen mindestens sein muss, dass sie als verschieden wahrgenommen werden. Wird der Reiz R auf einer linearen Skala dargestellt, ist $\Delta R = R_2 - R_1$ die kleinste sinnvolle Einheit auf dieser Skala. Die JND hat eine wesentliche Bedeutung bei der Auslegung von haptischen Systemen, da sie das Auflösungsvermögen eines Erfassungs- oder Wiedergabesystems bestimmt. Das haptische System muss nun für die sichere und eindeutige Übermittlung von Informationen zum Nutzer in der Lage sein, Reizunterschiede darzubieten, welche die JND überschreiten und auf der anderen Seite muss das haptische System so genau in der Darstellung sein, dass die technisch bedingte Ungenauigkeit unterhalb dieser Schwelle liegt. Ansonsten kann der Nutzer entweder die dargestellte Information nicht erfassen oder erhält durch Wahrnehmung der technischen Auflösungsgrenzen ein falsches Bild.

Der Effekt der *Maskierung* führt dazu, dass Randbedingungen, die nicht durch den eigentlichen Reiz bedingt sind, die Wahrnehmbarkeit dieses Reizes beeinflussen. Dadurch kann einerseits der absolute Schwellwert als auch die JND verschoben werden. Maskierungseffekte können zeitlich oder örtlich bedingt auftreten. Wird beispielsweise ein gewisser Reiz über eine längere Zeitdauer dargeboten, so sinkt die Wahrnehmbarkeit dieses speziellen Reizes über die Zeit ab. Bei den örtlichen Maskierungseffekten existiert noch der Begriff der *Zweipunktschwelle*, welche ein Maß dafür ist, wie groß ein örtlicher Abstand eines zweiten Reizes zu einem bestehenden Reiz sein muss, dass der zweite als eigenständige Wahrnehmung auftritt. Dies spielt besonders bei taktilen Reizen eine Rolle, denn die menschliche Haut besitzt nicht an allen Stellen die gleiche Fähigkeit zur Ortsauflösung. Diese Auflösung ist zum Beispiel an den Fingerspitzen besonders hoch.

Zwei wichtige psychophysikalische Gesetze sind das *Weber'sche Gesetz* und *Fechners Gesetz* bzw. die *Stevens'sche Potenzfunktion*. Das Weber'sche Gesetz

$$\frac{\Delta R}{R} = c \quad (3.1)$$

besagt, dass der wahrgenommene Unterschied zwischen zwei Reizen von der absoluten Intensität des Reizes abhängig ist. Weber untersuchte diesen Zusammenhang durch Auflegen von Gewichten auf die Haut. Die Konstante c ist dabei vom untersuchten Reiz und der damit verbundenen Wahrnehmung abhängig. Das Weber'sche Gesetz hat über das Spektrum der Sinne eine weite Gültigkeit (Terhardt (1998)), Abweichungen gibt es vor allem im

Bereich der absoluten Wahrnehmungsschwelle. Fechners Gesetz oder dessen Umformulierung durch Stanley S. Stevens zur Potenzfunktion

$$R = \rho S^\kappa \quad (3.2)$$

setzt die Stärke eines wahrgenommenen Reizes R in einen exponentialen Zusammenhang zu dem vorliegenden Stimulus S . Dabei sind ρ und κ reale Konstanten, die vom betrachteten Reiz und der Wahrnehmung abhängen (mögliche Werte für den Exponenten κ können z.B. aus Kern (2009) entnommen werden).

3.4 Der menschliche Tastsinn

Da der menschliche Tastsinn mit seinen taktilen und kinästhetischen Modalitäten die Grundlage der haptischen Wahrnehmung und damit auch den Ansatzpunkt für die Entwicklung eines Systems zur Haptikanalyse darstellen, wird im Folgenden noch kurz auf die Rezeptoren in der menschlichen Haut und im Bewegungsapparat eingegangen.

3.4.1 Rezeptoren und deren Charakteristik

In der menschlichen Haut und im Bewegungsapparat finden sich eine Vielzahl verschiedener Sinneszellen, die bei der Bildung von verschiedenen Sinneswahrnehmungen zum Einsatz kommen. Im Rahmen dieser Beschreibung sollen allerdings nur solche Rezeptorgruppen betrachtet werden, die für die haptische Wahrnehmung von Belang sind. Grundsätzlich werden die einwirkenden mechanischen Kräfte durch Verformungen der Haut und der Muskeln von angepassten Rezeptoren aufgenommen. Eine grundsätzliche Kategorisierung der verschiedenen Sinneszellen ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

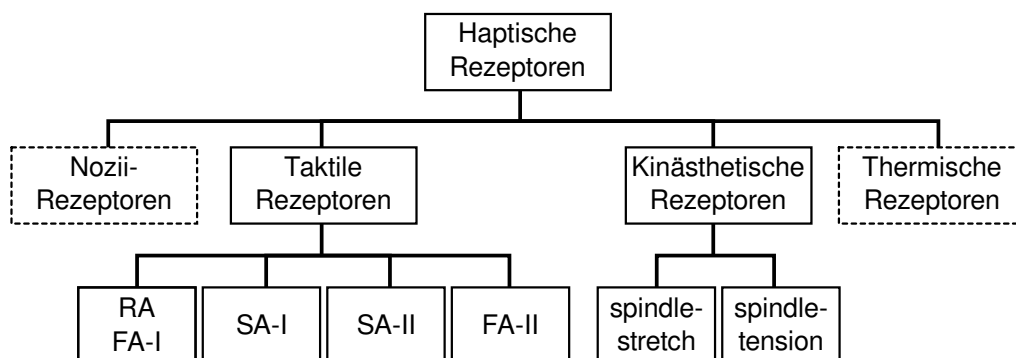


Abbildung 3.1: Kategorisierung der Charakteristik haptischer Rezeptoren

Die taktilen Sensoren befinden sich in der Hautoberfläche und reagieren auf Verformungen der Haut in normaler und tangentialer Richtung. In den Fingern und besonders in den Fingerkuppen ist die Dichte dieser Rezeptoren besonders hoch. Die einzelnen Rezeptoren unterscheiden sich nun dadurch, dass sie auf statische Auslenkungen, Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen reagieren. Die Neurophysiologie unterscheidet hier vier verschiedene Typen von Rezeptoren, die in drei unterschiedlichen Frequenzbereichen aktiviert werden:

- Slow Adaption Rezeptoren (SA-I und SA-II), die *Merkel-Zellen* und *Ruffini-Zellen*. Die Rezeptoren dieses Typs nehmen niedrige Veränderungsgeschwindigkeiten und statische Verformungen der Haut auf.
- Rapid Adaption bzw. Fast Adaption Rezeptoren (RA bzw. FA-I Typ), die *Meissner-Körperchen*. Diese Rezeptoren sind geschwindigkeitsaktiviert und nehmen Änderungen in der einwirkenden Kraft, bzw. Verformung auf.
- Fast Adaption Rezeptoren (FA-II), die *Pacini-Körperchen*. Diese schnell adaptierenden Rezeptoren nehmen Beschleunigungen wahr und sind daher für die Wahrnehmung von raschen Änderungen der einwirkenden Kräfte und Bewegungen verantwortlich.

Die Frequenzbereiche, die von den verschiedenen Rezeptoren wahrgenommen werden können, sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die angegebenen Grenzen sind dabei keine absoluten Grenzen, sondern geben vielmehr an, in welchem Frequenzbereich die jeweiligen Rezeptoren hauptsächlich aktiviert sind.

Rezeptor	Stimulus	Charakteristik	Frequenzbereich
Merkel-Zellen	statische Verformungen	SA-I	0,3 – 3 Hz
Ruffini Zellen	Scherungen	SA-II	3 – 40 Hz
Meissner-Körperchen	Vibrationen	RA/FA-I	15 – 400 Hz
Pacini-Körperchen	Vibrationen	FA-II	400 – 1000 Hz

Tabelle 3.1: Aktivierungsfrequenzen von taktilen Rezeptoren (nach R.Schmidt (2001))

Die kinästhetischen Rezeptoren befinden sich im Inneren des Körpers, also in der Muskulatur, den Gelenken und Sehnen. Durch diese Anordnung erfassen sie einwirkende Kräfte und Auslenkungen von Gesamtextremitäten. Da die vorgelagerten Schichten der Haut und eventuell weitere Gelenke oder ganze Körperteile vor den Rezeptoren als eine Art Tiefpass wirken, haben die kinästhetischen Rezeptoren einen wesentlich geringeren Dynamikumfang bei der Aufnahme von Reizen als die taktilen Sensoren. Das Auflösungsverhalten für die wirkenden Kräfte und Auslenkungen ist allerdings mit den taktilen Sensoren vergleichbar. Die kinästhetischen Sensoren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- spindle-stretch-Rezeptoren, die Dynamic Bag Fibres und Static Bag Fibres. Diese liegen parallel zu Muskelsträngen und nehmen deren Längenänderung auf
- spindle-tension-Rezeptoren, die Golgi Tendon Organe. Diese Art von Rezeptoren liegt in Serie mit Muskelsträngen und nimmt dort wirkende Kräfte auf.

Die genannten Rezeptoren spielen nun bei der haptischen Wahrnehmung zusammen, es sind hier nicht nur verschiedene Typen von Rezeptoren gleichzeitig aktiv, sondern auch gleichzeitig mehrere Rezeptoren von einem Typ, verteilt über den menschlichen Körper. Daraus resultiert auch die Ortsabhängigkeit der haptischen Wahrnehmung. Aus dem gleichzeitigen Einfluss mehrerer Rezeptoren entsteht auch für die gesamte haptische Wahrnehmung eine höhere zeitliche und örtliche Auflösung, als sich durch die Summe der einzelnen Rezeptoren ergeben würde. Die technischen Kennwerte des Tastsinnes an sich sind im folgenden Abschnitt charakterisiert.

3.4.2 Technische Kennwerte bei der haptischen Wahrnehmung

Die technischen Kennwerte der haptischen Wahrnehmung sind für die Auslegung von haptischen Systemen, also auch für das in dieser Arbeit zu entwickelnde Haptikanalysesystem, von großer Relevanz. Sie bestimmen die technischen Parameter, was das Auflösungsvermögen und die Grenzwerte der verwendeten Sensoren und Aktoren angeht. Einige Eckdaten der haptischen Wahrnehmung im Bezug auf die zu untersuchenden Benutzerschnittstellen sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Eine vollständigere Aufstellung zur haptischen Wahrnehmung findet sich beispielsweise bei Kern (2009).

Grundgröße	Kennwert	Körperstelle	Wert
Statische Auslenkung/ Position	Hautauslenkung, Absolutschwelle	Fingerspitze (taktil)	$10\mu m$
	Zweipunktschwelle (räuml. Auflösung)	Fingerspitze (taktil)	$2 - 3mm$
		Handfläche (taktil)	$10 - 11mm$
Positionsauflösung, Differenzschwelle (JND)		Fingergelenk (kinästhetisch)	$2,0^\circ$
		Handgelenk (kinästhetisch)	$2,0^\circ$
Dynamische Auslenkung (Vibration)	Frequenz, Obergrenze (taktile Wahrnehmung)	Finger (taktil)	5-10kHz
	maximale Empfindlichkeit	Fingerspitze, Handfläche (taktil)	bei $200 - 300Hz$
	Amplitude, Absolutschwelle	Fingerspitze, Handfläche (taktil)	$0,1 - 0,2\mu m$ bei $200 - 300Hz$
Kraft	Kraft, Absolutschwelle	Fingerspitze (taktil)	$0,8mN$
		Handfläche (taktil)	$1,5mN$
	Kraft, Differenzschwelle (JND)	gesamter Körper (kinästhetisch)	$5 - 10\%$

Tabelle 3.2: Kennwerte der haptischen Wahrnehmung

Für die Auslegung eines haptischen Systems ist nicht nur die sensorische Kapazität der haptischen Wahrnehmung wichtig, sondern auch die Grenzen der Ausgabefähigkeit der menschlichen Hand als Quelle von Bewegungen und Kräften. Aus diesem Grund sind in Tabelle 3.3 einige relevante Kennwerte zur Ausgabefähigkeit zusammengestellt, für eine umfassendere Aufstellung wird hier wiederum auf die Literatur verwiesen.

Grundgröße	Kennwert	Körperstelle	Wert
Geschwindigkeit	Maximale Geschwindigkeit	Finger (handnächstes Gelenk)	$17rad/s$
		Finger (mittleres Gelenk)	$18rad/s$
Bewegung	Bandbreite(Bewegung und Kraftausübung)	Finger	$5 - 10Hz$
		Arm, unerwartete Reaktion	$1 - 2Hz$
		Arm, periodische Bewegung	$2 - 5Hz$
		gelernte Trajektorie	bis $5Hz$
		Reflex	bis $10Hz$
Kraft	Maximale Kraft	Zeige-, Mittel-, Ringfinger	$40 - 50N$
		Daumen	$85 - 100N$
		Handgelenk	$35 - 65N$

Tabelle 3.3: Kennwerte Ausgabefähigkeit der menschlichen Hand

3.5 Begriffe in haptischen Systemen

Bei der Beschäftigung mit haptischen Systemen werden nicht nur die unterschiedlichsten Begriffe und Definitionen verwendet, die sich nicht von selbst in ihrer Bedeutung erschließen, sondern die Verwendung und Bedeutung unterscheidet sich auch noch je nach Fachdisziplin. Daher soll für die weiteren Begriffsklärungen an dieser Stelle zunächst festgehalten werden, was unter einem *haptischen System* zu verstehen ist: als haptische Systeme soll im Rahmen dieser Arbeit Geräte und Objekte betrachtet werden, die für die haptische Interaktion mit dem Menschen eingesetzt werden. Dies umfasst alle Komponenten, die in einem Gerät oder Objekt zusammenwirken, um die haptische Interaktion mit dem Menschen zu gestalten. Von dieser Feststellung aus können nun einige weitere Begriffe eingeführt und erläutert werden. Die Definitionen der Begriffe sind dabei konform zu den Begrifflichkeiten bei Kern (2009).

Als **Nutzer** wird ein Mensch bezeichnet, der mit einem haptischen System in Interaktion tritt.

Haptische Geräte sind Systeme, die Ausgangsgrößen erzeugen, die haptisch wahrnehmbar sind. Daraus folgt, dass der Mensch bei der Interaktion mit einem haptischen Gerät durch eine beliebige haptisch wahrnehmbare Eigenschaft Informationen erhalten kann. Insofern werden auch Gegenstände die durch ihre Oberflächengestaltung Informationen transportieren zu haptischen Geräten. Am Beispiel von Tasten lässt sich die Eigenschaft als haptisches Gerät leicht darstellen: eine eventuelle Oberflächenmarkierung erlaubt es dem Nutzer, gewisse Tasten durch Berührung zu identifizieren, die Tasten selbst vermitteln dem Nutzer durch eine veränderliche Betätigungskraft Informationen darüber, welcher Schaltzustand gerade eingenommen wird. Die Informationen werden im Falle der Oberflächenstruktur taktil übertragen, bei der Bewegung der Taste spielen sowohl die kinästhetische Wahrneh-

mung als auch die taktile Wahrnehmung eine Rolle. Allerdings kann die Informationsvermittlung über Oberflächenstrukturen auch eine kinästhetische Komponente haben, wenn diese Strukturen eine gewisse räumliche Ausdehnung haben, die zum Informationsgehalt beiträgt.

Als **haptische Interaktion** wird der Vorgang der Informationsvermittlung zwischen haptischem Gerät und Nutzer beschrieben. Diese Informationsvermittlung kann unidirektional oder bidirektional sein, in vielen Fällen findet allerdings ein bidirektionaler Informationsfluss statt, da der Nutzer durch seine Interaktion gewisse Ziele erreichen will, wobei er Informationen vom haptischen Gerät erhält.

Haptische Displays sind solche haptischen Geräte, bei denen die Information, welche bei der haptischen Interaktion übermittelt ist, veränderlich ist. Haptische Displays sind zum Beispiel sogenannte Braille-Zeilen, die Sehbehinderten das Lesen von Texten in Blindenschrift an einem Rechner ermöglichen. Neben der taktilen Komponente können haptische Displays allerdings auch kinästhetische Komponenten enthalten.

Unter einer **haptischen Schnittstelle** versteht man ein haptisches Gerät, das neben einer haptischen Interaktion mit veränderlicher dargebotener Information auch Daten über die Interaktion des Menschen mit der haptischen Schnittstelle erfasst und diese Daten auch übermitteln kann. Haptische Schnittstellen kommen oft in Benutzerschnittstellen technischer Systeme vor, da das technische System nicht nur Systeminformationen in den Benutzer einkoppeln soll, sondern auch aus der Interaktion mit dem Nutzer Rückschlüsse über den Bedienungswunsch desselben zieht.

Telemanipulationssysteme sind Systeme, die eine haptische Interaktion des Menschen mit Objekten erlauben, von denen er räumlich getrennt ist. Diese Systeme müssen auf der Seite des Menschen eine haptische Schnittstelle aufweisen und auf der Seite der Objekte mit einem **haptischen Manipulator** ausgestattet sein. Der haptische Manipulator interagiert mit den Objekten und misst dabei die wirkenden physikalischen Größen für die menschliche haptische Wahrnehmung. Die gemessenen Größen werden übertragen und über die haptische Schnittstelle in den Nutzer eingekoppelt. Die Aktionen des Nutzers an der haptischen Schnittstelle beeinflussen wiederum die Interaktion des haptischen Manipulators mit dem entfernten Objekt.

Eine Erweiterung der Telemanipulationssysteme stellen **haptische Simulatoren** dar. Ein solches haptisches System ist in der Lage, einem Nutzer die haptische Interaktion mit einem virtuellen Objekt zu ermöglichen. Dazu werden die Größen, die bei der Interaktion mit einem realen Objekt auftreten würden durch einen Rechner simuliert und dem Benutzer an einer haptischen Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Haptische Simulatoren und die damit erstellbaren haptischen Simulationen können für sehr komplexe Szenarien beim Training von Bewegungshandlungen, Erzeugung von virtueller Realität und auch bei der Entwicklung neuer haptischer Geräte eingesetzt werden.

Eine wichtige Unterscheidung lässt sich noch in **aktive** und **passive haptische Geräte** treffen. Die aktiven haptischen Geräte benötigen zur Darstellung der Informationen eine äußere Energiequelle und in den meisten Fällen auch eine gewisse Steuer- und Regelungslogik. Durch diese erhöhte Komplexität sind sie allerdings in der Lage, eine größere Vielfalt an Informationen durch ihre haptischen Eigenschaften zu vermitteln. Mit zunehmendem Informationsgehalt in Richtung Mensch und in der Gegenrichtung in ein technisches System besteht immer mehr die Notwendigkeit aktive haptische Geräte zu verwenden. So sind die allermeisten Telemanipulationssysteme aktive haptische Geräte, Haptiksimulatoren kommen nicht ohne aktive haptische Geräte aus. Daneben finden auch passive hapti-

sche Geräte eine breite Anwendung, vor allem sind auch viele Systeme haptische Geräte, die im normalen Sprachgebrauch nicht als solche bezeichnet werden, wie zum Beispiel in Papier geprägte Braille-Zeichen oder einfache Taster.

Einen Grenzbereich stellen dagegen Benutzerschnittstellen dar, die zwar eine taktile Schnittstelle für die Interaktion mit dem Nutzer zur Verfügung stellen, allerdings keine haptischen Informationen an den Nutzer übergeben können. Gemeint sind hier beispielsweise Bedienoberflächen mit berührungsempfindlichem Bildschirm. Diese besitzen eine harte Oberfläche, welche nicht über Aktuatoren zur Informationseinkopplung in den Nutzer verfügt. Die Interaktion geschieht allerdings durch Feststellen einer ausgeübten Kraft des Nutzers durch die Oberflächenberührung und die Verformung des Fingers. Da aber eine Rückkopplung von taktilen oder kinästhetischen Informationen, die von der Schnittstelle selbst ausgeht fehlt, sind diese Benutzerschnittstellen keine haptischen Schnittstellen im Sinne der oben genannten Definitionen und auch nicht Gegenstand der Betrachtungen in dieser Arbeit.

3.6 Kategorien haptischer Eigenschaften

Da die haptische Wahrnehmung ein sehr breit gefächertes Spektrum an Empfindungen umfasst, mit dem wiederum eine Vielfalt von Objekteigenschaften abgebildet werden kann, müssen die verschiedenen haptischen Eigenschaften zunächst kategorisiert werden. Dabei wird im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich in statische haptische Eigenschaften und dynamische haptische Eigenschaften unterschieden. Statische haptische Eigenschaften sind Objekteigenschaften, die durch die Oberflächen und die geometrische Form einer haptischen Schnittstelle bestimmt werden. Dynamische haptische Eigenschaften sind dagegen durch den inneren Aufbau eines Objekts bestimmt und treten erst bei der Interaktion mit dem System zu Tage.

Eine der statischen haptischen Eigenschaften ist die **haptische Textur** (Kern (2009)). Darunter sind Objekteigenschaften zusammengefasst, die ausschließlich die taktile Wahrnehmung ansprechen. Die haptische Textur eines Objekts wird hauptsächlich durch die Feinstruktur seiner Oberfläche bestimmt, die durch bloßes Berühren der Oberfläche wahrgenommen werden kann. Darunter fallen Oberflächenrauigkeiten, kleine Erhebungen, sowie die Materialeigenschaften der Objektoberfläche. Die haptische Textur einer Holzoberfläche unterscheidet sich so zum Beispiel allein durch die Struktur und die Wärmeleitfähigkeit von einer Metalloberfläche. Ebenfalls unter die Kategorie der haptischen Textur fallen speziell angebrachte Oberflächenveränderungen, sogenannte haptische Marker. Diese sind beispielsweise auf Tastaturen zu findende Obereflächenenerhebungen, die eine Orientierungsinformation taktil erfassbar machen. Strukturelemente auf der Oberfläche, deren enthaltene Information nur durch einen tastenden Explorationsvorgang ermittelt werden können, zählen nicht zu den haptischen Texturen, da hier die kinästhetische Wahrnehmung ebenfalls eine Rolle spielt. Als Beispiel könnten hier Drehschalter mit einer Oberflächenmarkierung herangezogen werden, die es erlauben die Schalterstellung durch einen Tastvorgang mit einer gewissen räumlichen Ausdehnung herauszufinden.

Als **haptische Gestalt** (Kern (2009)) werden Objekteigenschaften bezeichnet, für deren Wahrnehmung in der Hauptsache die kinästhetische Wahrnehmung eine Rolle spielt. Diese Eigenschaften entstehen durch die geometrische Form des Objekts und seine äußeren Abmessungen. Die taktile Wahrnehmung spielt hier nur insofern eine Rolle, dass sie als

Kontroll- und Führungsgröße für den Explorationsvorgang verwendet wird. Betastet ein Mensch ein unbekanntes Objekt, um dessen greifbare Form und damit die haptische Gestalt zu ermitteln, so wird die Kraft, welche auf das Objekt ausgeübt wird, von der taktilen Wahrnehmung erfasst und steuert die Bewegung der Finger und der Hand so, dass ein Kontakt zwischen den Fingern und dem Objekt bei der Bewegung erhalten bleibt. Die eigentliche Information über die äußere Form des Objekts wird durch die Stellung der Finger und der Hand ermittelt.

Die dynamischen Eigenschaften lassen sich wiederum in zwei Kategorien aufteilen: die **tangentialen dynamischen Eigenschaften** und die **tiefen dynamischen Eigenschaften**. Diese beiden Kategorien sind gekennzeichnet durch die verschiedenen Bewegungs- und Kraftrichtungen, welche für die jeweiligen Klassen kennzeichnend sind. Bei den tangentialen dynamischen Eigenschaften werden Effekte betrachtet, die durch Entlangfahren an der Oberfläche eines Objekts und der Interaktion mit der Oberfläche auftreten. Dies ist zum Beispiel die Reibung bei einer Bewegung auf der Oberfläche, Slip-Stick-Effekte und ein Anhaften an der Oberfläche (z.B. bei klebrigen Oberflächen). Die tiefen dynamischen Eigenschaften sind Eigenschaften, die durch den inneren Aufbau eines Objekts begründet sind, die Kraft- und Bewegungsrichtungen, die hier eine Rolle spielen verlaufen normal zur Oberfläche des Objekts. Diese Eigenschaften treten allerdings nur zu Tage, wenn Bewegungen oder Kräfte auf das Objekt wirken. Als Beispiel kann hier ein flexibler Ball dienen: die Kompressibilität des Balls kann nur durch eine Interaktion ermittelt werden, dazu muss eine Kraft ausgeübt werden, die in einer Verformung des Balls und damit in einer wirkenden Gegenkraft resultiert.

3.7 Bedeutung für die weiteren Betrachtungen

Aus der Vorliegenden Untersuchung der Psychophysik als Wissenschaftsdisziplin und des menschlichen haptischen Sinnes lassen sich nun die folgenden Schlüsse für die weitere Entwicklung ableiten: zunächst ist eine einfache Berechnung von haptischen Empfindungsgrößen aus einzelnen oder wenigen Kenngrößen eines technischen System zum gegenwärtigen Stand nicht möglich. Allerdings existieren sehr wohl Ansätze, wie Empfindungsgrößen beschrieben werden können und auch quantifiziert werden können. Da sich die menschliche haptische Wahrnehmung als dynamischer Prozess bei der Bewegung und Interaktion aus dem taktilen und kinästhetischen Sinn des Menschen ergibt, sollte der Mensch also so weit wie möglich in ein Haptikanalysesystem einbezogen werden. Systeme, welche für eine Haptikanalyse ohne den Menschen geeignet sein sollen, müssen sowohl hinreichend genaue Sensorsysteme als auch aktive Bewegungsmöglichkeiten aufweisen.

Kapitel 4

Framework für die Haptikanalyse

Für eine zielgerichtete Entwicklung eines Haptikanalysesystems ist es zunächst wichtig, eine geeignete Vorgehensweise zu bestimmen. Diese definiert sowohl die Systemstruktur als auch die grundlegenden Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilen eines solchen Systems. Hierbei sind mit Schnittstellen allerdings die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Modulen im System bezeichnet, an denen Daten zwischen den Systemteilen fließen. Die Aufteilung in Module mit verschiedenen Schnittstellen soll die Wiederverwendbarkeit und die Erweiterbarkeit von Systemen fördern. Die Entwicklung einer Insellösung für eine spezifische Problemstellung führt ansonsten leicht in eine Sackgasse und passt nur bedingt zu einem systematischen Ansatz.

4.1 Problemstellung und Anforderungen

Wie eingangs angerissen, besteht die Grundaufgabe eines Systems zur Analyse haptischer Eigenschaften von Bedienelementen und damit den sie beinhaltenden Benutzerschnittstellen darin, das Bedienelement mit Hilfe eines technischen Systems zu vermessen und die so erfassten Daten in einen Bezug zu den menschlichen Empfindungen zu bringen. Dazu ist es zum Einen notwendig, den menschlichen Tester so weit wie möglich in den Analysevorgang einzubinden und zum Anderen auch eine angemessene Genauigkeit der erfassten technischen Parameter zu gewährleisten, denn nur so können auch im Anschluss wieder technische Systeme für bestimmte haptische Eigenschaften charakterisiert werden.

Aus der Problemstellung folgt direkt, dass zumindest die Art und Weise, wie der Mensch selbst mit der Bedieneinrichtung in Kontakt tritt, erfasst werden muss und auch von dem technischen Analysesystem so nachgebildet werden sollte. Im günstigsten Fall kann sofort auch während diesem Erfassungsvorgang das Bedienelement vermessen werden. Auf diese Art und Weise kann man dem Problem begegnen, dass nicht von vornherein klar ist, welche physikalischen Größen, die am Bedienelement erfassbar sind, überhaupt für die menschliche Empfindung in diesem Fall von Belang sind. Manche technische Größen wie beispielsweise Drehmomente bei Drehschaltern sind zwar für das technische System als Objekt in der Fertigung eine wichtige Größe, können allerdings vom Menschen nur mittelbar wahrgenommen werden, da der Mensch Drehmomente taktil nur über Scherungen der Haut oder andererseits die kinästhetische Wahrnehmung auflösen kann.

Für die Untersuchung eines Bedienelements allein durch eine technische Einrichtung lautet eine wichtige Forderung, dass eine geeignete Messvorrichtung im Wesentlichen zu

der gleichen Interaktion mit dem Bedienelement in der Lage sein sollte, wie auch der Mensch selbst. Dies hat hauptsächlich Folgen für die Gestaltung der Messvorrichtung, was ausübbar Kräfte, Bewegungen und notwendige Geschwindigkeiten bei der Ausführung der Bewegungen angeht.

Beiden Analysezeigen gemeinsam ist außerdem die Anforderung, dass das Bedienelement möglichst in einer realistischen Einbausituation eingefügt sein sollte und vor allem auch nicht durch angebrachte Zusatzteile oder Zerlegen in seiner Funktion verändert wird. Nur so kann gewährleistet werden, dass das Bedienelement selbst und nicht zusätzlich die Messeinrichtung analysiert wird.

Das Auswertungsverfahren für die ermittelten technischen Parameter sollte seine Motivation möglichst in der menschlichen Wahrnehmung selbst finden. Durch eine Modellierung der menschlichen Wahrnehmung - zumindest bis zu einem gewissen Grad - können manche Analyseschritte nachvollzogen werden, ohne den direkten Bezug auf den Menschen aufzulösen. Mit einer solchen Vorgehensweise soll es ermöglicht werden, gewisse Bereiche des Analysesystems zu überprüfen und sinnvolle Justierpunkte zu definieren. Vor allem lassen sich so auch Rückschlüsse darauf ziehen, welche Sensitivität bestimmte Parameter während der Analyse aufweisen - dies ist bei der gezielten Entwicklung neuer Bedienelemente von großem Interesse, da hier Grenzen für die abbildbaren Größen und auch Toleranzen festgelegt werden müssen.

Eine Einschränkung der Anforderungen kann allerdings dahingehend getroffen werden, dass ein und das selbe System nicht die verschiedensten Bedienelemente analysieren können muss. Dies ist auf Grund der vielfältigen Ausformungen von Bedienelementen, die der Mensch in einer technischen Umgebung vorfindet auch kaum zu leisten. Ein konkretes System das nach dem Gedanken des vorgestellten Rahmens implementiert wird, ist demzufolge in der Lage eine bestimmte Klasse von Bedienelementen zu analysieren. Das Rahmenwerk soll hier die Ausformung der konkreten Systeme vorgeben und Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten definieren. So können verschiedene Module entwickelt werden und für bestimmte Anwendungsfälle neu kombiniert werden. Ausgehend davon wird die Zusammenstellung eines ganzen *Werkzeugkastens* für die Haptikanalyse möglich. Bei der Entwicklung von Insellösungen ist eine solche Wiederverwendbarkeit von Einzelteilen zumindest stark erschwert, wenn sie überhaupt sinnvoll möglich ist.

4.2 Besonderheiten bei der Haptikanalyse

Die Haptikanalyse weist gegenüber anderen Gebieten der Psychophysik noch einige Besonderheiten auf, die im Folgenden kurz thematisiert werden. Der wichtigste Unterschied zu Bereichen wie der Optik oder der Psychoakustik besteht darin, dass die Haptikanalyse nur durch direkte, aktive Interaktion mit dem Untersuchungsobjekt durchgeführt werden kann. Die wahrgenommenen haptischen Eigenschaften entstehen überhaupt erst durch diese Interaktion mit dem Untersuchungsobjekt. So ist es zum Beispiel bei Untersuchungen in der Psychoakustik möglich, eine Schallquelle unabhängig von einem menschlichen Zuhörer zu vermessen und die Quelle des Effekts steht weiterhin kontinuierlich zur Verfügung. Daraus folgt für die Haptikanalyse weiter, dass die wahrgenommenen Eigenschaften des zu analysierenden Objekts und die untersuchenden Personen sich gegenseitig beeinflussen - auch dies ist in anderen Gebieten der Psychophysik so nicht gegeben. Beim genannten Beispiel der Psychoakustik beeinflusst der Hörer die Eigenschaften der Schallquelle bei der

Erzeugung des Stimulus nicht.

Ein weiterer Faktor, welcher die Haptikanalyse verkompliziert, ist das Problem, dass nicht in jedem Fall überhaupt bekannt ist, welche physikalisch auftretenden Größen überhaupt eine Rolle für die wahrgenommenen haptischen Eigenschaften spielen. Dies folgt aus dem Umstand, dass die haptische Wahrnehmung des Menschen eine Komplexempfindung ist, welche aus unterschiedlichen Modalitäten der Wahrnehmung kombiniert wird. Weiterhin ist auch die Nachbildung des menschlichen Tastsinnes zwar ein Gebiet mit dem sich die Forschung intensiv auseinandersetzt, die tatsächlichen Fähigkeiten der menschlichen taktilen Wahrnehmung können derzeit allerdings noch nicht erreicht werden, wenn man nicht nur die Auflösung und die Genauigkeit einzelner Sinneszellen betrachtet, sondern auch die räumliche Verteilung und die Anzahl der sensitiven Elemente. Daher wird man bei der Gestaltung eines technischen Erfassungssystems prinzipiell Abstriche machen müssen, was die Nachbildungsmöglichkeiten des menschlichen Wahrnehmungsapparats angeht.

Ein ähnlicher Faktor wie die Erfassung von Daten bei der haptischen Wahrnehmung betrifft die Rückgabe von künstlich erzeugten haptischen Eigenschaften an den Menschen. Zum Einen ist auch hier nicht genau bekannt, welche technischen Modalitäten für eine sinnvolle Simulation benötigt werden, zum Anderen ist es auch sehr schwer, bestimmte Stimuli isoliert an den Menschen weiterzugeben. Existierende Einrichtungen zur haptischen Einkopplung von Signalen in den Menschen beschäftigen sich meist mit der Erfassung, dem Transport und der Wieder-Einkopplung von Signalen, wie zum Beispiel bei der Telemanipulation oder aber der Erzeugung von haptischen Signalen, deren sichere Interpretation dann durch Lernen dieser Rückkopplungssignale beim Menschen ermöglicht wird. Diese Herangehensweisen sind zwar für die Unterstützung des Menschen bei der Bedienung von technischen Einrichtungen hilfreich, können allerdings in dieser Art nicht ohne Weiteres für die Analyse der menschlichen haptischen Wahrnehmung herangezogen werden. Für den ersten Fall fehlt ein parallel vermessenes Objekt, welches überhaupt erst die haptischen Eigenschaften hat, beim zweiten Fall wird erst gar nicht von einem konkreten Objekt oder bestimmten haptischen Eigenschaften ausgegangen, sondern der Mensch schlicht mit einem günstigen Stimulus konfrontiert.

Die Haptikanalyse untersucht zwar nur einen eingeschränkten Bereich des gesamten Wahrnehmungsspektrums, allerdings spielen hier anders als zum Beispiel in der Psychoakustik unterschiedliche Modalitäten (Weg, Kraft, usw.) eine Rolle. Daher ist die Verarbeitung hier ein wenig komplexer. Des Weiteren treten alle Effekte nur auf, wenn der Mensch auch wirklich mit den Gegenständen in seiner Umgebung interagiert. Der Mensch ist also nicht einfach dem Reiz ausgesetzt und kann diesen aufnehmen, sondern er verändert auch durch seine Reaktion die Entstehung.

Ein weiteres Problem ist, dass die haptischen Rückkopplungen nicht in der gleichen einfachen Art, wie andere Rückkopplungen erzeugt und wieder auf den Menschen eingekoppelt werden können. Hier sind sehr komplexe technische Einrichtungen nötig und außerdem ist es nicht geklärt, wie man gezielt bestimmte haptische Reize auf den Menschen zurückkoppeln kann, sodass der Mensch wirklich eine der Realität entsprechende Wahrnehmung erfährt. Somit wird die Überprüfung von Analyseergebnissen durch die Darbietung eines künstlichen Reizes und die Bewertung dieses Reizes durch den Menschen wesentlich komplizierter.

4.3 Framework für die Analyse haptischer Eigenschaften

Das im folgenden vorgestellte Framework (Braun et al. (2008a)) für die Analyse haptischer Eigenschaften von Bedienelementen beschreibt einen strukturellen Aufbau für die Implementierung von Haptikanalysesystemen.

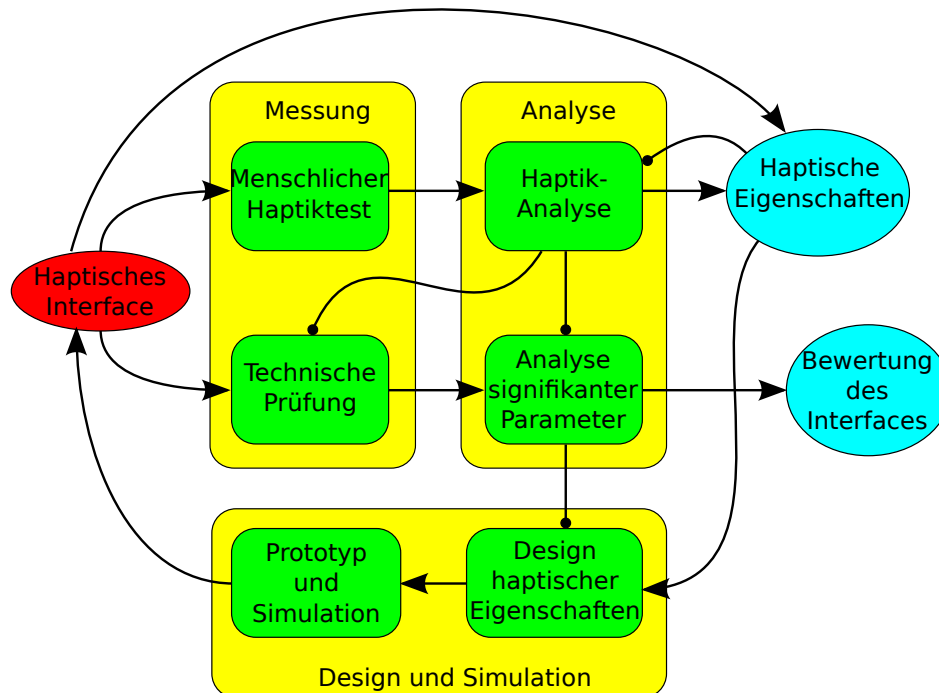


Abbildung 4.1: Systemstruktur des Frameworks für die Haptikanalyse

Dadurch wird die prinzipielle Idee der Parallelschaltung von menschlicher und technischer Analyse festgelegt und Module definiert, die in einer gegebenen Aufgabenstellung dann ausformuliert werden müssen. Eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Analysekanäle und eine Entwicklungsschleife werden ebenfalls definiert. Durch eine solche Schablone für den Entwurf von Haptikanalysesystemen soll sowohl die Wiederverwendbarkeit kompletter Module als auch den Entwurf von wiederverwendbarer Software für die einzelnen Analyseschritte gefördert werden.

4.3.1 Grundlegende Methodik

Die grundlegende Idee bei dem vorgestellten Framework (Abb. 4.1) zur Analyse haptischer Eigenschaften ist es, den Menschen und ein technisches Untersuchungssystem in gegenseitiger Unterstützung einzusetzen und nicht einen menschlichen Tester durch ein technisches System zu ersetzen. Durch eine solche Vorgehensweise sollen die bisher bestehenden Probleme bei der Haptikanalyse adressiert werden. Das Hauptproblem ist nämlich die Unvereinbarkeit der Ergebnisse menschlicher Tests und der Protokolle technischer Prüfungen. Diese Unvereinbarkeit entsteht bei der herkömmlichen Vorgehensweise durch die voneinander verschiedenen Vorgehensweisen und die unterschiedliche Zielsetzung bei den Untersuchungsvorgängen. Das Ziel einer menschlichen Untersuchung ist es, zu überprüfen,

ob der menschliche Tester die Empfindungen bei der Interaktion als für den Einsatzzweck passend betrachtet. Gegebenenfalls können diese Empfindungen auch in Kategorien eingeteilt und einzeln bewertet werden, der Zusammenhang mit den technischen Parametern ist dem Tester allerdings nicht bekannt und für seine Bewertung auch nicht von Belang. Im Gegensatz dazu steht eine technische Prüfung eines Bedienelements, die in der Regel zur Kontrolle der Vorgaben bei der Herstellung oder zum Nachweis der Einhaltung spezifizierter Parameter dient. Dabei werden physikalische Größen bei einem Prüfungsvorgang erfasst, der entweder so gewählt wird, dass er möglichst gut zur Erfassung genau dieser Parameter geeignet ist oder Bestandteil eines Prüfprotokolls ist. Der Vorgang orientiert sich in der Regel an einer möglichst einfachen Durchführbarkeit im Rahmen einer industriellen Produktion, ein Abgleich mit einer Untersuchung durch einen menschlichen Tester ist nicht Bestandteil des Untersuchungsvorgangs.

Die parallele Einbindung des menschlichen Testers zieht sich durch die verschiedenen Bereiche der Haptikanalyse in der Messung und der Interpretation der erfassten Messwerte. Beim Messvorgang (4.3.2) soll eine Untersuchung des Prüflings durch einen Menschen messtechnisch begleitet werden und die dabei auftretenden Größen erfasst werden. Eine technische Untersuchung kann aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen dann parallel erfolgen. Bei der Analyse (4.3.3) werden sowohl die Empfindungen des Menschen bei seiner Untersuchung erfasst, als auch die Messwerte aus menschlicher und technischer Untersuchung durch geeignete Methoden untersucht. Hier sollen dann nach Möglichkeit spezielle technische Eckdaten ermittelt werden, die zu den haptischen Eigenschaften korrespondieren. Die Daten aus dem technischen Untersuchungsvorgang können daneben auch für eine Bewertung des Prüflings durch Prüfprotokolle mit den unterschiedlichsten Anforderungen herangezogen werden.

Des Weiteren sieht das Framework auch den Schluss einer Entwicklungsschleife durch eine Entwurfsschleife vor. In dieser soll es möglich sein, aus den Erkenntnissen über haptische Eigenschaften eines Prüflings bzw. einer Prüflingsklasse und den damit einhergehenden Eigenschaften der technischen Parameter neue Zusammenstellungen haptischer Eigenschaften zu generieren und diese wiederum in ein Bedienelement oder eine entsprechende Ausgabeeinheit abzubilden. Damit soll es zum Einen möglich sein, schnell bestimmte haptische Eigenschaften zusammenzustellen und so ein gewünschtes Gesamtverhalten einer neuen Einrichtung zunächst simuliert zu erhalten. Zum Anderen bietet eine solche Rückkopplungsschleife große Vorteile bei der Abstimmung des Analysesystems selbst und bei der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen technischen Größen und menschlichen Empfindungen, da auch die Ausgaben eines solchen Simulationszweiges wieder als Eingangsdaten für das Analysesystem verwendet werden können.

Die so motivierten Module werden nun in den folgenden Abschnitten weiter vertieft und die Anforderungen an eine konkrete Ausformung formuliert. Ebenso wird auf die Schnittstellen zwischen den Modulen eingegangen und Aufteilungen zwischen den einzelnen Systemen vorgenommen.

4.3.2 Messvorgang für die Haptikanalyse

Der initiale Punkt des Analysevorgangs ist eine geeignete Vermessung des haptischen Bedienelements. Diese Vermessung geschieht mit zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen, der menschlichen Untersuchung und der Vermessung mit einem technischen System (vgl. Braun et al. (2007)). Den Ausgangspunkt bildet dabei die Untersuchung eines haptischen

Bedienelements durch einen menschlichen Tester. Dabei muss zunächst einmal festgestellt werden, welche Aspekte der menschlichen Wahrnehmung für ein gegebenes Bedienelement zum haptischen Eindruck beitragen. In diesem Schritt wird noch keine technische Untersuchung durchgeführt, sondern lediglich der menschliche Tester in seiner Interaktion mit dem Bedienelement beobachtet. Daraus lässt sich dann ableiten, welche Größen im Folgenden messtechnisch zu erfassen sind und wie ein geeignetes Sensorsystem für den nächsten Schritt prinzipiell gestaltet sein muss. Des Weiteren können auch die Aussagen des menschlichen Testers über das zu untersuchende Element aufgenommen werden und für die spätere Bewertung abgelegt werden.

Im zweiten Schritt wird entsprechend den gewonnen Erkenntnissen ein Sensorsystem eingesetzt, das die menschliche Interaktion mit dem Bedienelement erfasst. Ein Ziel dieser Erfassung ist die Aufzeichnung von Daten über das Verhalten des Bedienelements selbst - diese Daten können dann für die Analyse herangezogen werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass der technische Aufwand zur Untersuchung sich auf die Entwicklung eines prinzipiell geeigneten, menschgeführten Systems beschränkt. Mit einem solchen System kann dann zumindest eine bestimmte Klasse von Bedienelementen untersucht werden (z.B. linear bewegliche Schalter oder Drehgeber) auch wenn sich diese Systeme in verschiedenen Einbausituationen befinden. Eine mögliche Entwicklungsschleife ist ebenfalls realisierbar, wenn die Aussagen des menschlichen Testers bei der Verwendung eines solchen Systems mit den Aussagen ohne dessen Einsatz verglichen werden. Hier sind zwei verschiedene Erkenntnisse möglich: zum Einen kann eingeschätzt werden, wie stark das Sensorsystem das Verhalten des Bedienelements aus Sicht des Testers verändert, zum Anderen können hier auch schon erste Informationen abgeleitet werden, ob die eingesetzten Messprinzipien die erwünschten Parameter korrekt erfassen. Das zweite Ziel der messtechnischen Begleitung der menschlichen Interaktion mit dem Bedienelement ist die Extraktion einer geeigneten Strategie für die technische Untersuchung.

Die technische Untersuchung orientiert sich schließlich an der menschlichen Untersuchung hinsichtlich der erfassten Größen und der Durchführung der Untersuchung an sich. Dies spielt sowohl bei der Entwicklung einer geeigneten apparativen Ausgestaltung eines Messsystems eine Rolle, als auch bei der späteren Durchführung der Tests mit der implementierten Einrichtung. Das technische System soll dann in der Lage sein, den Untersuchungsvorgang ohne Führung durch einen menschlichen Bediener durchzuführen und die entsprechenden Daten zu ermitteln. Gewisse Einschränkungen sind allerdings bei dem Einsatz des technischen Systems tolerierbar, so muss das System nicht grundsätzlich für alle in Frage kommenden Einbausituationen einer Bedieneinrichtung einsetzbar sein, es soll lediglich in einem Prüfumfeld die Untersuchung durch einen Menschen zweckmäßig nachbilden können. Die technische Untersuchung soll sich aber in der Weiterentwicklung eines Systems nicht nur in der Nachbildung des Menschen erschöpfen, es ist sinnvoll, dass die technische Untersuchung auch in der Lage ist, akzeptierte Prüfprotokolle zu erstellen, was für eine Dokumentation in der herkömmlichen Art und Weise notwendig ist. Unter dem Gesichtspunkt einer Etablierung in Prüfprozessen ist dies eine wichtige Funktion. Außerdem sieht die Veränderbarkeit des Prüfprozesses an sich vor, dass der Vorgang bei der Untersuchung so optimiert werden kann, dass geforderte haptische Eigenschaften untersucht und ein Erfüllungsgrad angegeben werden kann. Dies bedeutet gegenüber einer reinen Nachbildung der menschlichen Untersuchung einen Zeitvorteil.

Die Messmethodik für die Untersuchung haptischer Eigenschaften lässt sich also wie folgt zusammenfassen: aus der Beobachtung des Menschen bei der Interaktion wird ein mensch-

geführtes System entwickelt, mit dem der Mensch und das Bedienelement gemeinsam beobachtet werden können. Daraus wiederum entsteht ein technisches System, das in der Lage ist, ein Bedienelement auf die gleiche Art und Weise zu untersuchen wie der Mensch. Das technische System wird dann unter Wahrung einer angepassten Untersuchungsstrategie auf einen Einsatz in einer industriellen Prüfstrategie optimiert. Im gleichen Grad, wie die Einbindung des Menschen in das Untersuchungskette abnimmt, steigt der Einfluss des technischen Systems sowie die Wiederholbarkeit und objektivierbare Durchführung beim Messvorgang.

Die Schnittstellen dieses Teils des Gesamtsystems liegen auf der einen Seite bei dem untersuchten Bedienelement selbst und auf der anderen Seite in den weiterzuleitenden Daten an das Analysesystem. Auch untereinander weisen die beiden Teile des Messsystems Schnittstellen auf. Auf der Seite des untersuchten Objekts ist diese Schnittstelle durch den physikalischen Kontakt zwischen dem haptischen Bedienelement und dem Messsystem gegeben. Die Anforderung an diese Schnittstelle ist hier, dass sie so beschaffen sein muss, dass eine Interaktion des Messsystems durch einen Menschen möglichst behinderungsfrei (für den menschgeführten Test) bzw. möglichst menschenähnlich (für den technischen Test) durchgeführt werden soll. Auf der Seite der Datenschnittstelle zum Analysesystem müssen die ermittelten Messwerte durch eine zeitliche Zuordnung untereinander und die zeitliche Anordnung im Verlauf erweitert werden. Diese Datenschnittstelle muss nicht zwingendermaßen als direkter Datenstrom ausgeführt werden. Eine Speicherung und Archivierung von Daten ist hier ebenfalls möglich. Gerade bei der Untersuchung von Bedienelementen durch den Menschen kann dies eine sinnvolle Vorgehensweise darstellen, da der menschliche Tester nicht beliebig lange und beliebig oft mit gleichbleibenden Aktionen zur Verfügung steht. Die Schnittstellen der Systeme untereinander bestehen während des beschriebenen Entwurfsvorgangs und bei in einem Abgleich der Daten aus beiden Systemen. Für eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Teilsysteme und die Verwendung in den gleichen Analysefunktionalitäten (4.3.3) muss unter Umständen eine Anpassung der verschiedenen aufgezeichneten Modalitäten vorgenommen werden.

4.3.3 Haptikanalyse und Extraktion signifikanter Parameter

Die Haptikanalyse ist der Hauptbestandteil des Analyseteils im Gesamtframework (Abb. 4.1) für die Haptikanalyse. An dieser Stelle werden die Daten verarbeitet, welche bei der messtechnischen Erfassung des Untersuchungsvorgangs ermittelt wurden. Die Art der Analyse ist an dieser Stelle noch nicht auf ein bestimmtes Modell oder eine Umsetzung festgelegt. Allerdings werden im Rahmen dieser Arbeit einige prinzipielle Forderungen an ein solches Analysemodul gestellt. Aus der Haptikanalyse folgt dann eine Extraktion von signifikanten Parametern, welche für die Entstehung bestimmter haptischer Eigenschaften im menschlichen Empfinden entscheidend sind.

Die wichtigste Forderung an ein Analysesystem, wie es hier beschrieben wird, ist die möglichst starke Orientierung des Systems selbst an der menschlichen Wahrnehmung. Durch eine solche Vorgehensweise soll dem Problem begegnet werden, dass das Analysesystem eine Verallgemeinerungsfähigkeit besitzen muss. Bekannt sind nämlich immer nur eine gewisse Menge von Datenpunkten, das heißt Empfindungen, die ein menschlicher Tester bei der Interaktion mit einem bestimmten Bedienelement hat. Wenn mit Hilfe eines Analysesystems nun weitere Bedienelemente des gleichen Typs oder der gleichen Klasse untersucht werden sollen, müssen zwei mögliche Variationen betrachtet werden: auf der

einen Seite muss sichergestellt werden, dass bei veränderten haptischen Eigenschaften des Prüflings das Analysesystem auch weiterhin gültige Ergebnisse produziert. Auf der anderen Seite steht die Frage, inwiefern sich die Empfindungen eines anderen Testers mit den bisher ermittelten decken. Der Einsatz eines Systems, welches die menschliche Wahrnehmung ein Stück weit nachbildet, soll die Beantwortung dieser beider Fragen unterstützen. Ein Modell der menschlichen Wahrnehmungskette, welches gemessene Größen aus Untersuchungen verarbeitet und an diesen Stützstellen zu den gleichen Ergebnissen kommt, wie der menschliche Tester, sollte auch prinzipiell zwischen den bekannten Datenpunkten ein besseres interpolierendes Verhalten zeigen, als ein völlig künstliches Analysemodell. Diese Annahme ist in der Systemmodellierung in der Regelungstechnik motiviert - auch hier wird versucht, durch eine Nachbildung des technischen Systems bis zu einem angemessenen Grad, die Beherrschbarkeit des Systems zu verbessern und Erkenntnisse über dessen Verhalten zu gewinnen.

Aus der Bestimmung der Größen, welche für die haptischen Empfindungen des Menschen bei der Interaktion mit einem gegebenen Bedienelement von Interesse sind (3.4), folgt die prinzipielle Forderung dass alle diese Größen in das Analysesystem eingehen müssen und dort in die Verarbeitung hineinspielen. Diese Forderung ist nach den Überlegungen zu einer sinnvollen Gestaltung eines Messsystems selbstverständlich, für die Auswahl geeigneter Methoden zur Analyse allerdings ein wichtiges Entscheidungskriterium. In diesem Zusammenhang steht auch die Forderung, dass zwischen der Erfassung der Messdaten und deren Einspeisung in das Analysesystem keine zusätzlichen Anpassungen nötig sein sollen, auch eine nachträgliche Interpretation der ausgegebenen Ergebnisse hin zu den haptischen Eigenschaften soll im Analysesystem selbst durchgeführt werden können. Diese Eigenschaften machen das Analysesystem zu einem geschlossenen System, welches aus den erfassten Daten Aussagen über haptische Eigenschaften generieren kann.

Weiterhin soll es möglich sein, aus dem Analysemodul heraus die Vorgehensweise bei der technischen Untersuchung eines Bedienelements (4.3.2) zu beeinflussen. Im einfachsten Fall wird diese Beeinflussung durch die Vorgabe von Testtrajektorien stattfinden, die aus der Vorgehensweise des Menschen bei der Interaktion extrahiert wurden. Allerdings sind auch weitere Einflüsse denkbar, wie optimierte Trajektorien für die technische Untersuchung oder spezielle Interaktionsarten für die Untersuchung von Teilbereichen des haptischen Gesamteindrucks. Dazu ist es hilfreich, zu den ermittelten haptischen Eigenschaften eines Bedienelements bestimmte überprüfbare Kenngrößen in den Messdaten zu identifizieren. Sollen nämlich die haptischen Eigenschaften eines Elements von einer technischen Einrichtung nicht neu analysiert, sondern lediglich vorgegebene Eigenschaften untersucht werden, ist es eigentlich ausreichend, nur genau diese zu untersuchen und nicht eine langwierigere Analyseprozedur durchzuführen.

Neben der Untersuchung der ermittelten Daten hinsichtlich haptischer Eigenschaften sollen in dem Analyseteil des Frameworks auch Prüfprotokolle erstellt werden, welche für die Bewertung gegebener Elemente in der industriellen Anwendung benötigt werden. Diese Darstellung ist insofern weniger problematisch, dass sie sich meist in einer graphischen Darstellung, Wertetabellen und verschiedenen Kennwerten der erfassten Signale erschöpft. Die Interpretation ist hier meist auf die Einhaltung von Grenzwerten beschränkt.

Die Schnittstellen dieses Teils liegen auf der einen Seite bei den ermittelten Daten aus dem Messsystem, eine Beschreibung dieser Schnittstelle fand bereits dort statt (4.3.2). Auf der anderen Seite hat der Analyseteil seine Schnittstelle in den ermittelten haptischen Eigenschaften und einer technischen Protokollierung dieser Eigenschaften. In der Protokollierung

kann auch eine Bewertung der getesteten Einheit enthalten sein, wenn Vorgaben existieren, die ein getestetes Element erfüllen soll. Die haptischen Eigenschaften des untersuchten Elements sollen als Erfüllungsgrade der verschiedenen Eigenschaften vorliegen. Gleichzeitig ist es zweckmäßig, aus einem Vergleich der haptischen Eigenschaften aus dem Analysesystem und aus einer reinen menschlichen Untersuchung Rückschlüsse für eine Modifikation des Analysesystems selbst zu ziehen. Hierunter fallen zum Beispiel die Kalibrierung des Systems für verschiedene Eigenschaften und deren Erfüllungsgrade. Übergreifende Aussagen wie ein *angenehmes* Gefühl sind aus einem System, das nach diesem Entwurfsmuster aufgebaut ist, nicht direkt ermittelbar. Eine solche Eigenschaft setzt sich im Allgemeinen aus sehr vielen verschiedenen Einzeleigenschaften zusammen und ist auch von Mensch zu Mensch stark verschieden. Hier kann ein technisches System kaum eine Entscheidung treffen, die objektiviert werden könnte.

Zwei weitere Schnittstellen weist der Analyseteil des vorgestellten Frameworks zu den Messsystemen und zum Entwurfs- und Simulationspfad auf. Hier soll zum Einen die geschilderte Beeinflussung des technischen Messsystems durch die Ergebnisse im Analysesystem geschehen, zum Anderen können aber auch erkannte Zusammenhänge zwischen Merkmalen in den erfassten technischen Parametern und haptischen Eigenschaften für den Entwurf von haptischen Eigenschaften neuer Elemente oder bei der Einstellung eines Simulationssystems verwendet werden.

4.3.4 Synthese haptischer Eigenschaften und Rückkopplung

Das Analysesystem kann durch einen Rückkopplungspfad auch für die Entwicklung neuer haptischer Bedienelemente eingesetzt werden. Existiert ein solcher Rückkopplungspfad, so kann dieser auch für die Verbesserung des bestehenden Analysesystems eingesetzt werden. Im Prinzip lässt sich der Entwicklungs- und Simulationspfad in zwei Einzelteile aufteilen: einen Arbeitsschritt oder ein Modul zur Erstellung haptischer Eigenschaften und ein zweites Modul zur Abbildung der gewählten Eigenschaften in realisierte Hardware.

Bei der Auswahl haptischer Eigenschaften kommt im Prinzip das gleiche Verfahren wie bei der Darstellung der Analyseergebnisse zum Einsatz - verschiedene Erfüllungsgrade von haptischen Eigenschaften können ausgewählt werden und diese werden mit Hilfe der Erkenntnisse aus dem Analysesystem in technische Eigenschaften einer möglichen Bedieneinrichtung abgebildet. Diese Abbildung von Wunschgrößen in technische Eckdaten kann dann wiederum durch Analyse im Framework untersucht werden und gegebenenfalls noch optimiert werden. Durch die Kopplung mit dem Analysesystem kann auch die Vorgehensweise beim Design verbessert werden, sodass eine sicherere Umsetzung der Wunschvorstellungen in ein mögliches Element gewährleistet wird.

Der letzte Schritt, bevor wieder ein haptisches Bedienelement zur Verfügung steht, ist die Prototypen- und Simulationsphase. Innerhalb dieses Schrittes sind zwei mögliche Pfade denkbar: die Verwendung eines Simulationssystems und der Entwurf eines neuen aktiven oder passiven haptischen Bedienelements. Bei der Verwendung eines Haptiksimulationssystems muss zunächst ein passendes Simulationssystem ausgewählt werden, welches in der Lage ist, die gewünschten Eigenschaften technisch abzubilden. Die Interaktion mit dem Simulationssystem sollte also für den Nutzer in ungefähr so ablaufen können, wie mit einem realisierten Bedienelement. Im Anschluss können die technischen Größen mit dem Simulationssystem abgebildet werden. Ein solches Vorgehen hat den Vorteil, dass verschiedene haptische Eigenschaften eines zu entwerfenden Elements von einem menschlichen Tester

ausprobiert werden können und so eine schrittweise Annäherung an ein gewünschtes Gesamtverhalten erreicht wird. So kann die lange Entwicklungsschleife zwischen der Spezifikation eines Bündels haptischer Eigenschaften und dem Entwurf neuer haptischer Geräte deutlich verkürzt werden. Der tatsächliche Entwurf eines Bedienelements findet dann erst statt, wenn mit der Simulation ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wurde. Neben der Unterstützung der Entwicklung neuer Elemente kann eine Simulation auch den Ausbau und die Verbesserung des Analysesystems unterstützen, wenn dem Anwender bestimmte Effekte zur Untersuchung vorgestellt werden und die erhaltenen Ergebnisse mit den erwarteten haptischen Eigenschaften durch das Analysesystem verglichen werden.

Für den Entwurf neuer aktiver oder passiver haptischer Bedienelemente gelten entsprechende Überlegungen wie bei der Haptiksimulation. Der Fokus der Anforderungsanalyse liegt hier allerdings nicht auf der Abbildbarkeit möglichst vieler unterschiedlicher haptischer Eigenschaften, sondern auf der Auswahl von Komponenten und Einzelteilen, die minimal notwendig sind, die gegebenen Vorgaben zu erfüllen. Bei passiven Elementen können hier notwendige Federkräfte und geeignete Mechanismen zur Erzeugung der ermittelten technischen Größen bestimmt werden. Bei aktiven Bedienelementen müssen auch die notwendigen Aktoren und Erzeugungsprinzipien für Kräfte und Momente bestimmt werden. Durch die bekannten technischen Grenzwerte kann hier wesentlich zielgerichteter vorgegangen werden, als bei einer reinen erfahrungsbasierten Auswahl. Der Schluss der Schleife besteht in diesem Fall durch die erneute Untersuchung mit dem Analysesystem, hier können auch menschliche Tester wieder das neue Bedienelement untersuchen. Eventuelle notwendige Nachbesserungen gehen dann nicht nur in den Entwurf der aktuellen Einheit ein, sondern können auch in die Optimierung des Analysemoduls im Framework und die Entwurfsmethodik eingehen.

4.4 Zusammenfassung zum Framework für die Haptikanalyse

Der Grundgedanke des beschriebenen Frameworks ist die Parallelschaltung des menschlichen Tests und der technischen Analyse. Hierbei werden sollen nicht nur die beiden einzelnen Vorgänge parallel durchgeführt werden, sondern der menschliche Test soll die Grundlage für die technische Durchführung bilden. Weiterhin wird auch gefordert, dass zumindest die Analyse haptischer Eigenschaften mit einem Modell erfolgen soll, das die menschliche Wahrnehmung in einer gewissen Art und Weise abbildet. Darauf aufbauend ist allerdings auch vorgesehen, bestimmte haptische Wunscheigenschaften durch die Überprüfung von Eckdaten zu verifizieren.

Aufbauend auf den, in diesem Kapitel getroffenen, Entscheidungen wird im Folgenden nun die Implementierung eines Haptikanalysesystems für Schalter als Repräsentanten für verschiedene haptische Eingabegeräte diskutiert.

Kapitel 5

Entwicklung und Implementierung eines Haptikanalysesystems für Schalter

Im Folgenden wird ein Haptikanalysesystems für Schalter vorgestellt, welches das in Kapitel 4 vorgestellte Framework praktisch realisiert. Die vorliegende Realisierung ist dabei nicht nur als ein an die Aufgabenstellung der Schalteranalyse angepasstes System zu sehen, sondern es realisiert auch Komponenten, die als Module für andere Analysesysteme zur Verfügung stehen. Dies zeigt zum Einen die Anwendbarkeit der vorgestellten Vorgehensweise auf die gegebene Aufgabenstellung und zum Anderen auch die Weiterführung des Werkzeug-Gedankens, der auf eine Wieder- und Weiterverwendbarkeit abzielt. Die Konzentration auf Schalter und Taster ist dabei dadurch motiviert, dass diese einen Großteil von verschiedenen Benutzerschnittstellen ausmachen, bzw. ein wesentlicher Bestandteil der meisten Benutzerschnittstellen zu technischen Einrichtungen sind.

Das Kapitel gliedert sich in eine Spezialisierung der Problemstellung, in welcher auf die Anforderungen der speziellen Aufgabenstellung eingegangen wird und diskutiert im Anschluss noch einmal kurz schon vorhandene Ansätze zur Lösung der Analyseaufgabe. Darauf aufbauend wird dann die Entwicklung eines Sensorsystems und die Auswahl von passenden Sensoren beschrieben, sowie die Integration zu einem einfachen handgeführten Sensorsystem ausgeführt. Ein weiterer Abschnitt beschäftigt sich dann mit der Entwicklung eines passenden industriellen Prüfsystems für Schalter und den dazu nötigen Entwicklungsschritten.

Nachdem die Datenerfassung sichergestellt ist, wird dann die Haptikanalyse von Schaltern mit Hilfe des entwickelten Systems beschrieben und verschiedene Auswertungsmöglichkeiten vorgestellt. Dazu gehört zum Einen die Analyse mit Hilfe psychophysikalischer Modelle, bzw. Modellen die nach einer Anpassung aus diesen hervorgehen. Zum Anderen werden aber auch technische Prüfverfahren, die ebenfalls mit dem vorgestellten System realisierbar sind, vorgestellt und deren Anwendbarkeit diskutiert. Verschiedene haptische Eigenschaften, die untersucht wurden, werden vorgestellt und auf den Zusammenhang mit technischen Größen wird ebenfalls eingegangen. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Zusammenfassung zur Haptikanalyse.

5.1 Spezialisierung der Problemstellung

Die spezielle Aufgabe, die im Folgenden durch das Analysesystem gelöst werden soll, stellt sich folgendermaßen dar: Es sollen die haptischen Eigenschaften verschiedener Taster und Schalter mit einer Bewegungsrichtung analysiert werden. Dabei sollen die haptischen Eigenschaften selbst ermittelt werden und ein technisches System für die industrielle Prüfung entwickelt werden, das ebenfalls zur Analyse von Prüflingen im Hinblick auf gegebene Eigenschaften in der Lage ist.

5.1.1 Schalter als haptische Bedienelemente

Zunächst stellt sich die Frage, inwiefern einfache Schalter und Taster, als haptische Bedienelemente aufgefasst werden können. Diese Fragestellung lässt sich unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten beantworten. Prinzipiell sind natürlich alle Bedienelemente, mit denen der menschliche Bediener in direkten taktilen Kontakt tritt und von denen er eine Rückkopplung auf dem selben Kanal erhält, als haptische Bedienelemente anzusehen. Eine sinnvolle Eingrenzung von *haptischen Bedienelementen* soll hier aber so getroffen werden, dass nur die Bedienelemente als solche bezeichnet werden, deren Rückkopplungseffekte auf den Menschen zielgerichtet auf die Information des Bedieners über den internen Zustand des Elements bzw. des unterliegenden Prozesses abzielt. Mit Hilfe dieser Definition lassen sich verschiedene Sonderfälle ausschließen und auch die Problemstellung genauer charakterisieren. Die einfachste Information, welche der Bediener von einem Taster oder einem Schalter erhalten kann, betrifft den elektrischen Schaltzustand des Elements. Im Allgemeinen ist dieser Schaltzustand durch eine schlagartig abfallende Betätigungskraft gekennzeichnet. Fehlt diese Rückkopplung, wird diese meist durch andere Modalitäten ersetzt, wie zum Beispiel durch eine akustische Rückmeldung (*klicken* bzw. zusätzlich erzeugte Signaltöne) oder eine visuelle Information (z.B. Leuchtpunkte bei Touchscreens). Folgt man außerdem der gegebenen Definition, stellt man fest, dass auch eine Anzahl von taktilen Bedienelement existiert, welche nicht als haptische Bedienelemente aufgefasst werden können, wie zum Beispiel Touchscreens oder Schieberegler. Bei Touchscreens erfolgt keine direkte Rückkopplung über den selben Kanal auf den Bediener, eine solche Rückkopplung ist weder aktiv noch passiv vorgesehen. Bei einfachen Schieberegler findet zwar eine Rückkopplung in Form einer auftretenden Reibungskraft auf, allerdings enthält diese abgesehen vom Ende des Bewegungsbereichs keinerlei Informationen über den internen Zustand des Reglers selbst oder des darunterliegenden technischen Prozesses. Allerdings stellt gerade diese Klasse an Elementen einen Grenzfall dar, da die aktuelle Position des Reglers auch eine Information darstellt, welche aus der vorgenommenen Einstellung folgt.

Der zweite Gesichtspunkt unter dem sich die Frage nach der Klassifikation von Schaltern bzw. Tastern als haptische Bedienelemente beantworten lässt, kommt aus dem Bereich der verarbeitenden Industrie, die solche Bedienelemente einsetzt. Das Ziel in diesen Zweigen ist es, dem Endkunden neben dem reinen Informationsgehalt über die technische Einrichtung auch eine gewisse Produktqualität sowie ein *Markengefühl* zu vermitteln. Diese komplexen Eigenschaften folgen zwar nur zu einem geringen Teil aus den speziellen haptischen Eigenschaften der einzelnen eingesetzten Elemente, sind aber durchaus ein Faktor bei der Auswahl oder bei der Entwicklung von Schaltern für bestimmte Einsatzzwecke. Die Problematik, zum Beispiel zwischen der Automobilbranche und Zulieferern, liegt hier in dem

Umstand, dass die Zuordnung zwischen komplexen Produkteigenschaften und Einzeleigenschaften der Bestandteile schwer möglich ist und auch eine gemeinsame Sprache für die Beschreibung von haptischen Eigenschaften fehlt. Allerdings ist gerade im Bereich der Automobilindustrie die Einrichtung von *Haptiklaboren* weit verbreitet und es werden in diesem Bereich auch große Anstrengungen unternommen, Eigenschaften zu spezifizieren. Dies geschieht dann allerdings oft derart, dass bestimmte Prototypen von Testern ausgesucht werden, diese genau vermessen werden und anschließend den Zubehörherstellern diese Messprotokolle als Spezifikation zur Verfügung gestellt werden. So kann es allerdings vorkommen, dass Parameter die beim Menschen gewisse haptische Eindrücke hervorrufen, nicht durch die Messprotokolle abgedeckt werden und so trotz Einhaltung der Vorgaben nicht die gewünschten Eigenschaften reproduziert werden können. Weiterhin ist die zielgerichtete Spezifikation ohne Prototypen im Vorfeld sehr schwierig bis unmöglich.

5.1.2 Relevante Aspekte der menschlichen Wahrnehmung

Die Schalter und Taster, welche im Rahmen der Aufgabenstellung betrachtet werden, schränken die sehr allgemein gehaltene Haptikanalyse in einigen Bereichen ein. Daraus folgt auch für das Analysesystem, dass nicht alle Eventualitäten abgedeckt werden müssen, sondern die relevanten Aspekte erfasst werden sollen. Dies ist auch unter dem Gesichtspunkt sinnvoll, dass der Entwurf eines vollständigen Analysesystems für alle denkbaren Modalitäten ohne einen eingeschränkten Startpunkt sehr schwer leistbar ist und auch nicht schrittweise erprobt oder evaluiert werden kann. Die Randbedingungen, auf die sich die folgenden Betrachtungen konzentrieren sind daher:

- Eingeschränkte Anzahl der Freiheitsgrade - nicht alle 6 Bewegungs- und Orientierungsfreiheitsgrade sind verfügbar. Die betrachteten Schalter haben eine lineare Betätigungsachse, entlang derer die Interaktion stattfindet. Die anderen Bewegungsfreiheitsgrade sind konstruktiv blockiert und daher nicht zugänglich. Außerdem geschieht auch der Vorgang des Drückens eines solchen Schalters entlang der Betätigungsachse, Drehungen beispielsweise sind oft auf Grund der Einbausituation oder der Geometrie völlig ausgeschlossen. Erweiterungsmöglichkeiten für das diskutierte System wären dann die Möglichkeit, die Betätigungsachse durch den Bediener zu verschieben oder gegenüber der mechanischen Bewegungsachse des Schalters zu verschieben. Weiterhin ist es dann auch möglich, schrittweise die Betätigung in komplexeren Trajektorien zuzulassen.
- Beschränkung auf taktile und kinästhetische Wahrnehmung - grundsätzlich hat ein menschlicher Tester beim Untersuchen eines haptischen Bedienelements eine Vielzahl von Wahrnehmungskanälen zur Verfügung. So kommt auch der Akustik und dem optischen Eindruck des Prüflings eine Bedeutung zu. Allerdings sind diese Wahrnehmungskanäle nach der psychophysikalischen Definition der Haptik nicht Bestandteil der haptischen Empfindung, sie spielen vielmehr bei der gesamtheitlichen Betrachtung einer *Produkthaptik* eine Rolle. Aus diesem Grund werden die Optik und die Akustik in diesem Zusammenhang vorerst nicht weiter betrachtet, da sie auch über völlig andere Wahrnehmungskanäle wahrgenommen werden als taktile und kinästhetische Reize.
- Spezielle Aspekte der taktilen Wahrnehmung - die menschliche taktile Wahrnehmung

umfasst eine Vielzahl an Modalitäten, welche aber für die spezielle Aufgabenstellung nicht alle betrachtet werden sollen. Grundsätzlich handelt es sich dabei um das Temperaturempfinden als primäre Größe, bei welcher der Reiz direkt einer Empfindung zugeordnet werden kann, sowie weitere komplexere Empfindungen wie die Wahrnehmung von Feuchtigkeit oder Oberflächenbeschaffenheit. Auch die Ortsauflösung sowie die ortsabhängige Empfindlichkeit der menschlichen Haut für die Kraftwahrnehmung soll für den Ansatz dieses Systems nicht speziell betrachtet werden. Diese Einschränkung ist insofern zweckmäßig, dass die betrachteten Schalter in den allermeisten Fällen durch die Fingerspitze aktuiert werden und nicht durch ständig wechselnde Körperareale.

5.2 Messsystem für die menschgeführte Haptikanalyse

Die Anforderungen an ein Sensorsystem für die Haptikanalyse im vorliegenden Fall lassen sich wie folgt zusammenfassen: zunächst ist für eine möglichst freie Bedienung des Schalters durch einen menschlichen Bediener zu sorgen. Der Mensch sollte nicht durch Führungseinrichtungen oder andere Teile des Sensorsystems in seinen Bewegungen oder seiner Interaktion mit dem Prüfobjekt eingeschränkt werden, da diese Einschränkungen das Empfinden und damit die wahrgenommenen haptischen Eigenschaften verfälschen können.

5.2.1 Spezielle Aspekte bei der Untersuchung mit dem Menschen

Die wichtigste zu erfassende Größe ist die Betätigungskraft in der Richtung der Betätigung. Diese Kraft sollte dabei möglichst unmittelbar zwischen dem zu vermessenden Objekt (hier der Schalteroberfläche) und dem Finger erfasst werden. Über diese Forderung kann sichergestellt werden, dass nicht zusätzliche Umgebungseffekte in die Messung eingehen, sondern nur die tatsächliche Kraft, die auch den menschliche Tester wahrnimmt.

Die zweite wichtige Größe ist der Betätigungsweg, der ebenfalls durch ein geeignetes System parallel zur Kraft erfasst werden muss. Für den Betätigungsweg gelten die gleichen Anforderungen wie für die Betätigungskraft, was die Beeinflussung des Menschen durch das Messsystem angeht. Grundsätzlich müssen sich beide Aufnahmesysteme hinsichtlich der Auflösungen (zeitlich und im Wertebereich) sowie der erfassbaren Werte am menschlichen Wahrnehmungssystem orientieren. Sowohl der offensichtliche Nachteil einer zu geringen Auflösung des Messbereichs als auch übertrieben genaue Messungen sind für die anschließende Analyse nicht zielführend.

5.2.2 Sensorik für die Kraftmessung

Für die Kraftmessung zwischen Fingerspitze und der berührten Schalteroberfläche sind zahlreiche Messprinzipien denkbar, daher muss zunächst eine sinnvolle Methode zur Vermessung ausgewählt werden. Eine prinzipielle Unterscheidung kann hier zwischen einer direkten Kraftmessung am Krafteinleitungspunkt und einer indirekten Messung an anderen Teilen des Messaufbaus vorgenommen werden.

Indirekte und direkte Kraftmessung

Der Vorteil bei indirekten Messverfahren liegt darin, dass die Beeinflussung des Menschen bei gleichzeitiger hoher Messgenauigkeit auf ein Minimum beschränkt werden kann. Zwei denkbare Messansätze sind in (Abb. 5.1) dargestellt.

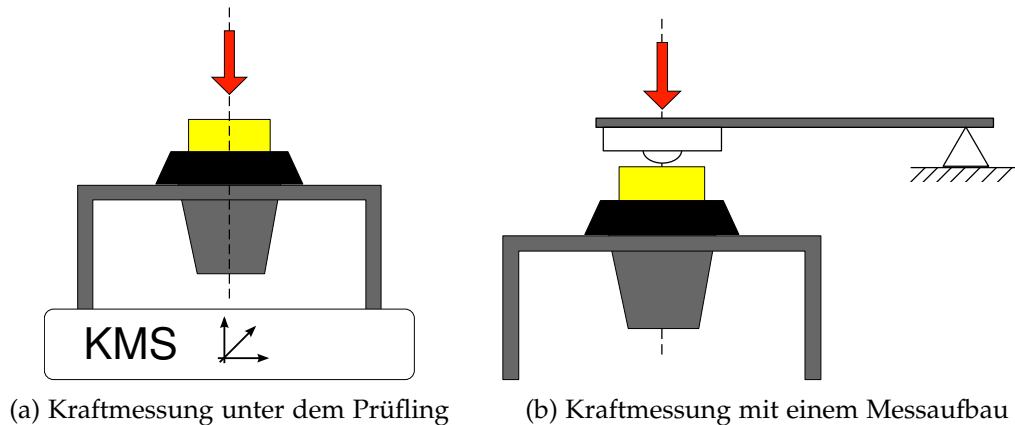


Abbildung 5.1: Indirekte Kraftmessung mit verschiedenen Aufbauten

Dabei skizziert Variante (a) eine indirekte Kraftmessung unter dem Montageort eines Schalterprüflings. Die Kraftmessung kann hier mit hoher Genauigkeit und einem relativ frei wählbaren Messbereich vorgenommen werden, da hier grundsätzlich aus der gesamten Vielfalt der am Markt verfügbaren Kraftsensorik ausgewählt werden kann. Hier wäre sowohl der Einsatz von Wägezellen für eine eindimensionale Vermessung der Betätigungskraft als auch die Verwendung eines Kraftmomentensensors für die gleichzeitige Erfassung verschiedener Krafrichtungen und die Feststellung eines Kräfteinleitungspunktes (Berechnung über die Momente) möglich. Die Voraussetzung für den Einsatz eines solchen Sensors ist allerdings eine hohe Steifigkeit des Aufnehmers, da sonst die Verformung des Sensors selbst auch in die Gesamtbewegung bei der Interaktion eingeht. Des Weiteren werden möglicherweise Schwingungen in der Betätigungskraft verstärkt oder durch das Verhalten des Aufnehmers überdämpft und so nicht mehr erfassbar. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist der Umstand, dass nicht die Betätigungskraft alleine gemessen werden kann, da der gesamte Montageort mitvermessen wird und dass eine Vermessung eines Schalters an einem beliebigen Einbauort nur sehr schwer möglich ist. Dies stellt einen erheblichen Nachteil dar, wenn man nicht nur isolierte Einzelschalter sondern ganze Bedienfelder vermessen will. Dies ist mit der geschilderten Vorgehensweise nur mit erheblichen Umbauten leistbar und die Verfälschung des Messergebnisses steigt schon alleine mit der Größe und dem Eigengewicht der Einrichtung, in der das Bedienelement verbaut ist.

Variante (b) umgeht einen Teil der geschilderten Nachteile durch eine andere Anbringung der Kraftsensorik. Hier wird eine Wägezelle oder ein Miniaturkraftmomentensensor an einem beweglichen Arm angebracht, der wiederum mit dem Kräfteinleitungspunkt auf dem zu untersuchenden Schalter aufliegt. Hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Kraft- oder Kraftmomentensensoren ist hier die Einschränkung zu sehen, dass das Gewicht und die Dimensionen des verwendeten Kraftaufnehmers durch die Anbringung zwischen Bediener und Prüfobjekt eingeschränkt wird. Die Anforderungen für eine hohe Steifigkeit des Sensors entsprechen grundsätzlich den unter Variante (a) ausgeführten. Die Vorteile liegen

bei dieser Anordnung darin, dass die bewegten Massen, welche Einfluss auf das Messergebnis haben könnten, gegenüber Variante (a) verringert sind. Des Weiteren wäre es mit dieser Anordnung auch möglich, den Betätigungsweg durch eine Winkelmessung am Lagerpunkt ebenfalls zu erfassen. Nachteilig ist in diesem Zusammenhang allerdings die Einschränkung des Bedieners insofern, dass er das Prüfobjekt nicht direkt berühren kann und die Bewegungsfreiheit dadurch stark eingeschränkt wird. Die Betätigungsrichtung wird durch die Lagerung des Führungsbalkens fest vorgegeben, wenn der menschliche Tester eine Kraft mit einem Vektor einleitet, der zur vorgegebenen Richtung verdreht ist, nimmt der Mensch zwar diese Kraft wahr, allerdings kann nur ein Teil davon gemessen werden, denn die restliche Kraft wird von der Lagerung aufgenommen. Insofern kann das Verhalten des Menschen bei der Interaktion nur eingeschränkt erfasst werden. Ähnliche Einschränkungen wie bei Variante (a) ergeben sich bezüglich der Untersuchung größerer Bedienfelder, für diese Fälle müsste die Lagerung weiter nach außen verschoben werden, was dann wiederum die bewegten Massen erhöht, wenn man eine gewisse Steifigkeit des Gesamtaufbaus gewährleisten will.

Für eine direkte Messung der Betätigungskraft zwischen der Fingerspitze des Menschen und dem Prüfobjekt sind zahlreiche Prinzipien der Kraftmessung denkbar, eingeschränkt wird die Menge der verwendbaren Prinzipien allerdings durch den Umstand, dass ein solcher Aufnehmer möglichst am Finger selbst befestigt werden soll und auch die Signalverarbeitungselektronik möglichst mobil vom Menschen getragen werden soll. Ein solches Vorgehen erlaubt es nämlich, die Bewegungsfreiheit des Menschen nur gering einzuschränken und ihm so eine möglichst unverfälschte Interaktion mit dem Prüfobjekt zu ermöglichen. Im Folgenden werden daher vier verschiedene Sensorprinzipien vorgestellt, die hinsichtlich ihrer Eignung für das Messsystem genauer untersucht wurden. Darüber hinaus existieren noch eine Vielzahl weiterer Messprinzipien, die aber zum Teil die Genauigkeitsanforderungen nicht erfüllen würden oder auch einen erheblichen Aufwand an Eigenentwicklung darstellen würden, was aber nicht der Fokus dieser Arbeit darstellt. Die vier Prinzipien sind: miniaturisierte Drucksensoren, Folien-Kraftsensoren (FSR - *force sensing resistor*), künstliche Haut und Miniaturwägezellen.

Miniaturdrucksensoren

Eine vergleichsweise intuitive Möglichkeit Kräfte ähnlich wie der Mensch aufzunehmen, bieten Miniaturdrucksensoren. Wenn diese in einen vergleichsweise einfachen Aufbau eingebettet werden, können einwirkende Kräfte gemessen werden und gleichzeitig die menschliche Fingerbeere nachempfunden werden. Der vorgeschlagene Ansatz besteht aus einem festen Trägermaterial, auf dem der miniaturisierte Drucksensor aufgebracht ist. Ebenfalls an diesem Träger befestigt ist eine flexible Membran, die einen Hohlraum umschließt, der mit einem Gel gefüllt ist. Dieses Messprinzip hat nun den Vorteil, dass einwirkende Kräfte mit relativer Unabhängigkeit von der Krafteinwirkungsrichtung gemessen werden können und gleichzeitig der Prüfling flächig wie mit einem menschlichen Finger berührt wird. Diesen Vorteilen steht gegenüber, dass die Genauigkeit einer solchen Kraftmessung im Vorhinein nicht ausreichend eingeschätzt werden kann und dass auch die mechanischen Eigenschaften der flexiblen Membran in die Messung eingehen werden. Vor allem wird auch die Verformung des Sensors selbst einen relativ starken Einfluss auf den Betätigungsweg haben, vor allem wenn die Betätigungskräfte ansteigen. Das dynamische Verhalten des Sensors bei schnellen Kraftänderungen und damit die Verfälschung der In-

teraktion mit dem Prüfobjekt stellen weitere Nachteile dieses Systems dar.

Künstliche Haut

Durch Systeme, die eine künstliche Haut implementieren, soll Maschinen ein taktilen Empfinden ermöglicht werden, dies macht sie ebenfalls zu Kandidaten als Sensorsystem für die Kraftmessung in der gegebenen Aufgabenstellung. Das in Weiß (2006) vorgestellte Sensorprinzip realisiert einen ortsauflösenden taktilen Sensor durch eine Elektrodenmatrix auf dem Grundmaterial und eine darüber angebrachte Schicht aus leitfähigem Schaumstoff (Abb. 5.2).

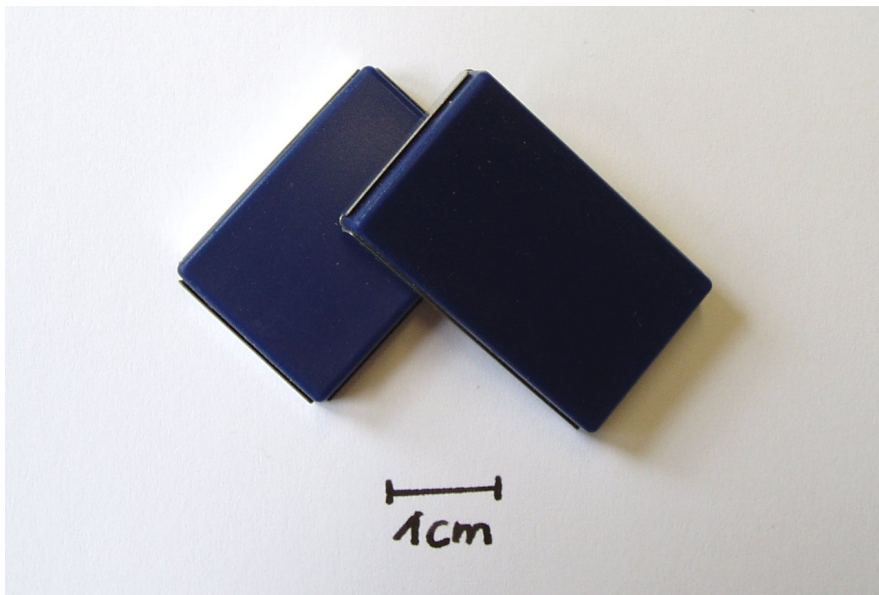


Abbildung 5.2: Integrierte taktile Aufnehmer

Durch eine, auf die Oberfläche des Sensors einwirkende, Kraft wird der Schaumstoff komprimiert und gegen die Messelektroden gepresst. Dadurch verändert sich der Kontaktwiderstand lokal, was dann durch geeignete Widerstandsmessungen zwischen den Elektroden für die Ermittlung eines zweidimensionalen Kraft-Profiles genutzt werden kann. Der Vorteil dieses Systems wäre, dass man in einem einzigen Schritt neben der Kraftmessung auch Informationen über die Oberflächenstruktur des Prüflings erhalten könnte und auch durch eine größere aktive Fläche keine bestimmte Positionierung des menschlichen Fingers beim Untersuchen eines Prüflings vorgeben würde. Allerdings sind die erhältlichen taktilen Sensoren für eine feinfühligere Kraftmessung selten geeignet, da eine verlässliche Kalibrierung über einen gewissen Zeitraum wegen Alterungs- und Belastungseffekten schwer durchführbar ist. Des Weiteren ist die Ortsauflösung der einzelnen Elektroden in der Matrix nicht mit der Dichte der sensitiven Elemente in der menschlichen Fingerspitze vergleichbar. Auch sind integrierte Module trotz starker Miniaturisierung immer noch von einer gewissen Baugröße, die beim Anbringen zwischen Finger und beweglichem Schalterteil den menschlichen Tester beeinflussen wird. Für die Systeme der künstlichen Haut gilt ebenfalls, dass die Verformung des Aufnehmers selbst wieder das Wegempfinden bei der Untersuchung verfälscht.

Folien-Kraftsensoren

Einer möglichst geringen Beeinflussung des Menschen durch das Kraftmesssystem kommen Folien-Kraftsensoren (Abb. 5.3) entgegen. Dieses Sensorprinzip basiert auf einer Anordnung von zwei Folien übereinander, welche durch eine einwirkende Kraft ihren elektrischen Widerstand ändern.



Abbildung 5.3: Aufbau eines Folienkraftsensors (FSR)

Ein solcher FSR(force sensing resistor)-Sensor besteht aus einer Folie, die mit strukturierten Elektroden bedruckt ist und einer weiteren Deckfolie, die mit einem leitfähigen Polymer bzw. einer leitfähigen Tinte beschichtet ist. Wird die Folie belastet, sinkt der elektrische Widerstand des Polymers zwischen den Messelektroden. Durch eine geeignete Wahl des resistiven Materials zwischen den Elektroden kann eine lineare Widerstandsänderung über der einwirkenden Kraft erreicht werden. Die Dicke eines solchen Sensorsystems liegt je nach Aufbau und Messbereich im Bereich von $200 - 500 \mu m$, damit ist das sensitive Element auch sehr leicht. Der Hauptnachteil dieser Aufnehmer für die gegebene Aufgabenstellung ist eine vergleichsweise niedrige erreichbare Genauigkeit ($< 5\%$ vom Endwert) und dem meist nicht passenden Messbereich. Des Weiteren ist für eine sinnvolle Kraftmessung mit den Foliensensoren eine gleichmäßige Flächenbelastung des Aufnehmers notwendig, was je nach Oberflächengeometrie des Prüflings problematisch ist. Gerade bei kleineren Schaltern ragt der Finger stark über die Seiten des beweglichen Schalterteils hinaus, eine genaue mittige Positionierung des Fingers über dem Schalter für eine optimale Ausnutzung des Aufnehmers ist für den Tester schwer zu realisieren und stellt eine wesentliche Bewegungseinschränkung dar.

Miniaturwägezellen

Die vierte untersuchte Möglichkeit für die Kraftmessung ist der Einsatz von Miniaturwägezellen an einem durch den Menschen frei beweglichen Träger. Diese Art der Aufnehmer kann wiederum in zwei verschiedene Klassen eingeteilt werden: zum Einen existieren Aufnehmer, die Kraft als Längenänderungen an einem metallischen Verformungskörper durch den Einsatz von Dehnmessstreifen messbar machen, zum Anderen werden auch Aufnehmer angeboten, welche die Verformung eines piezoelektrischen Kristalls durch einen gemessenen Ladungstransport bestimmen. Letztere zeichnen sich im all-

gemeinen durch eine sehr hohe Steifigkeit und Unabhängigkeit von Störgrößen aus, erfordern allerdings eine komplexe Elektronik für die Bestimmung der Ladungsverschiebungen. Dies macht sie für ein mobiles System, das möglichst vom Nutzer getragen werden soll, schlechter einsetzbar. Sensoren auf Basis von Dehnmessstreifen weisen ebenfalls hohe Steifigkeitswerte auf, sind allerdings anfälliger gegen Störgrößen, vor allem weisen sie meist eine stärkere Temperaturabhängigkeit auf, als Sensoren auf Basis von piezoelektrischen Materialien. Die Temperaturabhängigkeit kann allerdings bei einigen Sensoren bereits im Aufnehmer kompensiert werden. Die Vorteile von Miniaturwägezellen sind die geringe Baugröße und ein geringes Gewicht bei einer gleichzeitig hohen Messgenauigkeit, sowohl was die Kraftmessung angeht als auch was das zeitliche Auflösungsvermögen betrifft. Nachteilig ist allerdings, dass auch diese Sensoren eine steife Oberfläche aufweisen, die zwischen Schalter und menschlichem Finger zum liegen kommt. Des Weiteren besitzen auch diese Sensoren einen relativ kleinen Kraftereinleitungspunkt, was insofern eine Einschränkung darstellt, dass der menschliche Tester nicht mit einem beliebigen Fingerteil auf einen Prüfling drücken kann. Diesem Nachteil kann allerdings durch eine geschickte Anordnung des Sensors auf einem handgeführten Träger begegnet werden.

Kriterien und Auswahl für einen Kraftsensor

Die vorgestellten Erfassungssysteme sollen nun in einem Vergleich bewertet werden, um die Auswahl eines bestimmten Messprinzips zu begründen. Dazu werden folgende Kriterien verwendet:

- die messtechnische *Genauigkeit* des Aufnehmers selbst - diese Eigenschaft betrachtet die messtechnisch erreichbare Genauigkeit des Sensorsystems selbst, nicht die des kompletten Messaufbaus. Als Aufnahmesystem wird hier der Komplex aus Aufnehmer (also dem sensitiven Element) und der zugehörigen Auswertelektronik betrachtet. Die Genauigkeit setzt sich dabei zusammen aus prinzipbedingter Wertgenauigkeit, Wiederholungsgenauigkeit und auch der erreichbaren zeitlichen Auflösung der Werte.
- die *Erfassbarkeit* der relevanten Kräfte bei der Interaktion - ein Messprinzip muss in der Lage sein, mittelbar oder unmittelbar die relevanten Kräfte bei der Interaktion mit einem Prüfobjekt zu bestimmen. Dazu können aber ähnlich wie bei der Bewegungsfreiheit des menschlichen Nutzers keine zu genauen Vorgaben für die Interaktionsrichtung oder den Kraftereinleitungsort gemacht werden, da die Art der Interaktion des Menschen mit einem Prüfobjekt auch Gegenstand der Untersuchung ist.
- die Komplexität der *Auswertelektronik* - diese ist wichtig für den Aspekt, dass der menschliche Tester möglichst ein mobiles System verwenden können soll, um ihn in der Interaktion mit einem Prüfobjekt nicht zusätzlich einzuschränken. Diese Eigenschaft spielt allerdings bei der indirekten Kraftmessung in beiden Varianten keine Rolle, da hier die Kraftmessung nicht am handgeführten System stattfindet.
- die *Anwendbarkeit* für verschiedene Prüflinge - um die Weiterverwendbarkeit des zu entwickelnden Systems nicht unnötig einzuschränken, sollte das System möglichst unabhängig vom verwendeten Prüfling sein. Dieses Kriterium ist besonders für die Untersuchung von Schaltern in einer Einbausituation in Bedienfeldern wichtig. Auch spielt die Oberflächengestaltung des Schalters insofern eine Rolle, dass die Geometrie der Oberfläche nicht die Kraftmessung an sich in ihrem Wert verändern sollte.

5. Entwicklung und Implementierung eines Haptikanalysesystems für Schalter

- die *Freiheit* des menschlichen Testers - der menschliche Tester soll möglichst in der Lage sein, einen Schalter so zu drücken, wie er es auch ohne das Messsystem tun würde. Dabei steht nicht von vornherein fest, in welcher Art oder Bewegungsrichtung der Mensch seinen Untersuchungsvorgang vornehmen wird, gerade diese Informationen sollen mit der verwendeten Methode der beobachteten menschlichen Untersuchung ermittelt werden.
- die Konstanthaltung des *Prüflingsverhaltens* - das Kraftmesssystem sollte das Verhalten des Prüfobjekts so wenig wie möglich verändern. Ansonsten ist zwar eine Kraftmessung möglich, der Mensch ist allerdings nicht in der Lage, mit dem Prüfobjekt selbst, sondern nur mit den kombinierten Eigenschaften des Gesamtsystems zu interagieren. Die verfälscht dann auch die haptischen Eigenschaften des untersuchten Objekts.
- der *Weiterverarbeitungsaufwand* für die Messwertbestimmung - diese Eigenschaft bildet ab, inwiefern die erfassten Messergebnisse direkt für die Bestimmung einer wirkenden Kraft verwendet werden können. Bei einigen Messprinzipien wird nicht direkt eine wirkende Kraft, sondern andere Parameter erfasst, die dann erst noch für die Bestimmung eines Messwerts herangezogen werden müssen - dabei können unter Umständen zusätzliche Fehlerquellen entstehen, die teils nur schwer eliminiert werden können.

	indirekte Messung Variante (a)	indirekte Messung Variante (b)	Druck- sensoren	Folien- kraft- sensoren	künstliche Haut	Miniatur- wäge- zellen
Genauigkeit	+	+	0	0/-	0/-	+
Erfassbar- keit	-	-	0	+	+	0/+
Auswert- elektronik	/	/	+	+	0	+
Anwend- barkeit	-	0	+	0	+	+
Freiheit	+	-	0/+	+	0	0/+
Prüfling- verhalten	+	-	0	+	0/-	+
Weiterver- arbeitung	0	+	0	+	-	+

Tabelle 5.1: Vergleich von Kraftmessprinzipien für die Haptikanalyse

Aus der zusammengefassten Bewertung der verschiedenen Kraftmessprinzipien in Tabelle 5.1 geht als bevorzugtes Messprinzip die Verwendung einer Miniaturwägezelle hervor, auch wenn hier bei der Erfassbarkeit der relevanten Werte und der Freiheit des Testers gewisse Abstriche in Kauf genommen werden müssen. Für die Auswahl eines konkreten Aufnehmers muss also speziell in diesen beiden Punkten eine möglichst günstige Lösung gefunden werden. Das heißt, der Aufnehmer muss möglichst klein und leicht sein, damit der Tester wenig durch diesen behindert wird und für die Anbringung des Aufnehmers

am menschlichen Finger muss der Ort und die Ausrichtung so gewählt werden, dass die Prüfbewegung möglichst mit der Krafteinleitungsrichtung des Aufnehmers zusammenfällt. Für die Kraftmessung im Haptikanalysesystem für Schalter wurde ein Miniatur-Druckkraftsensor des Typs 8413-20 beschafft. Dieser weist bei einer Nennkraft von 20N einen Durchmesser von 9,7mm bei einem Gewicht von weniger als 15g auf. Der Sensor basiert auf einem System mit Folien-Dehnmessstreifen, die Größe der einwirkenden Kraft ist proportional zu einem elektrischen Widerstand, der am Sensorausgang gemessen werden kann. Der Sensor zeichnet sich auch durch eine besonders hohe Genauigkeit aus, so wird die Linearitätsabweichung mit $\leq 0,25\%$ vom Messbereichsendwert angegeben. Günstig wirkt sich auch eine relativ hohe mechanische Eigenresonanzfrequenz von 11kHz aus, diese liegt außerhalb des zu untersuchenden Frequenzbereichs.

5.2.3 Positionsmesssystem für die Wegmessung

Für die Abbildung der kinästhetischen Wahrnehmung in das Messsystem für den menschlichen Testvorgang muss die Position des beweglichen Schalterteils, bzw. die Position des menschlichen Fingers bei der Interaktion erfasst werden. Hier gelten ähnliche Anforderungen bei der Auswahl einer passenden Technik wie bei Kraftmessung (5.2.2): die Position muss entsprechend den menschlichen Fähigkeiten zur Positionsauflösung erfasst werden, prinzipiell ist auch eine ausreichende zeitliche Auflösung für eine Erfassung von Bewegungen bei der Interaktion zu leisten. Ebenso gelten ähnliche Einschränkungen für die Beeinflussung des Prüfobjekts und des menschlichen Testers durch eine Messeinrichtung. Die Aufgabe des Positionsmesssystems ist die Bestimmung der Position des beweglichen Schalterteils während der Interaktion des Testers.

Für die Wegmessung wurden fünf unterschiedliche Prinzipien näher für ihre Eignung in der gegebenen Aufgabenstellung untersucht: indirekte Wegmessung an einem Messaufbau, Wegmessung durch ein Lasertriangulationssystem, kapazitive/induktive Näherungssensorik, Inertialsensorik sowie Wegmessung mit einem Bildverarbeitungssystem. Die einzelnen Prinzipien werden im Folgenden kurz näher erläutert, einander gegenübergestellt und dann die Auswahl eines geeigneten Systems begründet.

Wegmessung an einem Messaufbau

Zunächst kann mit einem Messaufbau, wie in Abbildung 5.1 (a) gezeigt, neben einer Kraftmessung auch eine Positionsmessung des beweglichen Schalterteils durchgeführt werden, ohne weitere Einschränkungen bei der Interaktion in Kauf nehmen zu müssen. Es sind hier zwei verschiedene Stellen für die Messung zugänglich, zunächst der Winkel zwischen der Ruhestellung und der aktuellen Stellung des Armes an der Lagerung und dann auch die Auslenkung des Armes auf der anderen Seite. Die Messung des Winkels ist insofern attraktiv, dass diese Stelle des Aufbaus sowieso mit einem gewissen Grad an mechanischem Aufwand realisiert werden muss, sodass das Einbringen eines Winkelsensors nur diesen Aufbau erweitern würde. Da aber grundsätzlich nur eine geringe Winkeländerung für die möglichst genaue Bestimmung der, in den Schalter eingeleiteten, Kraft angestrebt wird, wird die Winkelmessung an der Lagerung prinzipbedingt ungenauer. Allerdings lässt sich diese Aufgabe mit Permanentmagneten an der Drehachse und einem feststehenden Magnetfeldsensor relativ gut lösen. Der zweite potenzielle Ansatzpunkt für eine Wegmessung liegt wie schon angesprochen am äußeren Ende des Armes. Die Position dieses Punktes

steht ebenfalls zur Auslenkung des beweglichen Schalterteils in einem leicht bestimmbareren Verhältnis. Die vertikale Position des Punktes kann prinzipiell mit einem beliebigen Verfahren bestimmt werden, wobei ein berührungslos arbeitendes System vorzuziehen ist, um nicht Reibungskräfte oder zusätzliche bewegte Massen in das System einzubringen. Vorteilhaft an diesen beiden Möglichkeiten ist, dass kein zusätzlicher mechanischer Aufwand außer dem schon verwendeten Messaufbau hinzugezogen werden muss und dass gut beherrschte Standardpositionsmesssysteme zum Einsatz kommen können. Dem gegenüber steht allerdings wie schon in 5.2.2 angesprochen das Problem, dass der Mensch stark eingeschränkt wird und durch den Messaufbau das Verhalten des Prüfobjekts vom Menschen nun mittelbar wahrgenommen werden kann.

Lasertriangulation

Da sonstige berührende Systeme für die Wegmessung des beweglichen Schalterteils die Nachteile eines spezifischen Messaufbaus nur weiter verkomplizieren, wurden im Anschluss nicht-berührende Messprinzipien untersucht. Ein sehr genaues Messverfahren stellt beispielsweise die Lasertriangulation dar. Bei diesem Verfahren zur Abstandsmessung wird ein Laserstrahl auf das zu vermessende Objekt fokussiert und der Laserpunkt auf dem Objekt mit einem ortsauflösenden optischen Sensor (im allgemeinen eine CCD-Zeile) beobachtet. Ändert sich die Entfernung der Objektoberfläche zum Sensor, wird der Laserpunkt auf dem Objekt unter einem anderen Winkel beobachtet. Aus diesem Beobachtungswinkel kann dann auf die Entfernung zum Objekt geschlossen werden. Die Vorteile des Verfahrens sind die hohe Genauigkeit, sowohl in der Auflösung und der Messwertabweichung als auch bei der möglichen zeitlichen Auflösung. Der entscheidende Nachteil für die Vermessung des beweglichen Schalterteils liegt hier allerdings darin, dass bei den meisten Schaltern dieser Teil bei der menschlichen Interaktion vom Finger verdeckt ist und daher nicht als Messoberfläche zur Verfügung steht. Eine eingeschränkte Verwendbarkeit besteht lediglich bei Schaltern deren beweglicher Schalterteil von der Rückseite beobachtet werden kann. Anderenfalls müsste das Prüfobjekt konstruktiv verändert werden, um eine optische Zugänglichkeit der Rückseite zu ermöglichen, was bei vielen Anwendungen unmöglich ist (speziell bei Schaltern als Bestandteil von Bedienungsfeldern).

Kamerasystem und Bildverarbeitung

Ein weiteres optisches Messprinzip stellt die Beobachtung des beweglichen Schalterteils von der Seite durch ein Kamerasystem dar, der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 5.14 skizziert. Bei den meisten Schaltern ist zumindest von der Seite die Bewegung der Schalteroberfläche beobachtbar und prinzipiell auch durch ein Bildverarbeitungssystem vermessbar. Des Weiteren kann auch die Bewegung des menschlichen Fingers und des Kontaktpunktes zwischen Finger und Schalter durch ein solches System verfolgt werden.

Mit modernen digitalen Kameras können ausreichend hohe Bildraten und Auflösungen erreicht werden, die eine Verfolgung ermöglichen. Die Herausforderung liegt in diesem Fall in der Erstellung einer geeigneten Bildverarbeitungskette für die Vermessung. Die Vorteile eines Kamerasystems liegen in der Berührungsfreiheit des Messsystems und darin, dass sich ein solches System an vielfältige Einbausituationen und Schalterformen mit wenig mechanischem Aufwand anpassen lässt. Weiterhin ist eine Kalibrierung des Systems relativ leicht möglich, wenn der bewegliche Schalterteil beobachtet wird: dieser wird auf verschie-

dene definierte Positionen gebracht, die mit einem externen System vermessbar sind, die ermittelten Positionen können im Folgenden als Kalibrierpunkte verwendet werden. Beim Verfolgen der menschlichen Fingerspitze können außerdem auch Informationen über typische Anrückbewegungen und Relativbewegungen zur Betätigungsachse ermittelt werden. Nachteilig an einem Kamerasystem ist die Notwendigkeit, ein angepasstes Bildverarbeitungssystem zu erstellen, welches dann auch mit den typischen Problemen eines solchen Systems behaftet sein wird, wie z.B. einer Beleuchtungsabhängigkeit. Des Weiteren existieren auch Schalter, deren Oberfläche bei der Interaktion vollständig verdeckt ist, diese sind dann nicht analysierbar. Für eine Realisierung muss auch auf eine ausreichend hohe erzielbare Bildrate der Kamera geachtet werden, um auch die dynamische Vorgänge ausreichend genau abbilden zu können.

Kapazitive und induktive Näherungssensorik

Ein Messprinzip, welches ohne Berührung oder Sichtverbindung zum beweglichen Schalterteil auskommt, lässt sich mit kapazitiven bzw. induktiven Näherungssensoren realisieren. Die Anordnung würde dann den Sensor unter den zu untersuchenden Schalter verlegen und dann die Position des beweglichen Schalterteils bestimmen.

Beide Sensortypen bestimmen den Abstand zwischen Sensor und anderen Objekten durch ein elektrisches bzw. elektromagnetisches Wechselfeld. Beim kapazitiven Sensor wird Abstand zwischen Objekt und Sensor durch die Bestimmung der Kapazität bzw. der Kapazitätsänderung bei einer Abstandsänderung bestimmt. Mit Hilfe eines elektrischen Schwingkreises kann die Kapazität zwischen den beiden idealisierten Kondensatorplatten ermittelt werden, sind die Eigenschaften des Dielektrikums zwischen den Platten bekannt, so kann daraus auf den Abstand zwischen den Platten geschlossen werden. Induktive Näherungssensoren verwenden ebenfalls ein elektrisches Wechselfeld, bestimmen aber den Abstand von einem elektrischen Leiter zum Sensor durch die Wechselwirkung zwischen induzierter Spannung im Leiter und dem Feld selbst. Grundsätzlich entziehen diese induzierten Spannung in einem Leiter dem elektrischen Feld Energie, dies reduziert die Schwingungsamplitude des Oszillators im Sender, woraus nach einer Kalibrierung auf den Objektabstand geschlossen werden kann. Die Idee bei der Verwendung eines solchen Sensors wäre nun, den Aufnehmer auf der Rückseite des Schalters unterzubringen und dann die Position des beweglichen Schalterteils zu bestimmen. Auf diese Art und Weise könnte man ohne Sichtverbindung oder mechanische Zusatzeinrichtung den Betätigungsweg ermitteln. Problematisch ist bei diesem Ansatz allerdings, dass marktübliche Sensoren meist nur für Schaltfunktionen erhältlich sind und daher Informationen zur tatsächlichen Wegmessgenauigkeit eher spärlich vorliegen. Des Weiteren stellt sich bei den kapazitiven Sensoren die Frage, inwiefern überhaupt eine sinnvolle Messung durch den Schalter hindurch möglich ist, vor allem weil auch der Finger auf dem Schalter die gemessene Kapazität weiter verändern wird. Eine Kalibrierung der Wegmessung zusammen mit dem Finger benötigt außerdem wieder ein Referenzmesssystem, ein Pseudoschalter mit interner Wegmessung ist hier nicht ausreichend, da durch jeden einzelnen Schalter die Kapazitäten wieder verändert werden. Für das induktive Messprinzip ist eine metallische Fläche zur Einkopplung von Wirbelströmen notwendig, diese wäre durch den Kraftsensor oberhalb des Schalters gegeben. Dabei stellt sich allerdings die Frage, inwiefern die beiden Sensoren sich gegenseitig beeinflussen. Für die Kalibrierung eines solchen Systems ergeben sich die selben Probleme wie beim kapazitiven Messprinzip.

Inertialsensorik

Einen grundsätzlich anderen Ansatz stellt der Einsatz von Inertialsensorik für die Positionsbestimmung des menschlichen Fingers beim Test dar. Die Idee ist hier, alle lateralen Beschleunigungen und die Drehratenänderungen zu erfassen und durch zweifache Integration auf die Position zurückzuschließen. Für ein solches Vorgehen existieren zwei Anforderungen: zum Einen müssen ausreichend genaue und vor allem driftstabile Sensoren verwendet werden und zum Anderen muss eine definierte Startposition vorgegeben werden. Die Sensoren selbst müssen auch ausreichend leicht und von einer kleinen Baugröße sein, sodass eine Montage direkt am menschlichen Finger möglich ist, ohne den Tester hier stark einzuschränken. Das Wirkprinzip von Inertialsensoren basiert stets auf einer trägen Masse, welche auf dem Sensor beweglich gelagert ist. Tritt nun eine externe Beschleunigung auf, bewegt sich der äußere Rahmen relativ zur trägen Masse und es kann eine Abstandsänderung zwischen der Masse und dem Gehäuse gemessen werden. Über eine bekannte Federcharakteristik der Aufhängung kann nun auf eine Kraft zurückgeschlossen werden und über die bekannte bewegliche Masse im nächsten Schritt auf eine Beschleunigung.

Durch den Einsatz von MEMS (Micro ElectroMechanical Structures) kann ein vollständiger Aufnehmer für Beschleunigungen oder Drehbeschleunigungen in sehr geringen Baugrößen realisiert werden. Zum Einsatz kommen diese Systeme momentan meist als Teil eines Bedienkonzept von elektronischen Handgeräten (Smartphones, Tablets, etc.) und auch als Sicherheitsfunktionalität für tragbare Rechner (freefall detection). Vorteilhaft beim Einsatz solcher Aufnehmer ist die Eigenschaft, dass sie ohne große Probleme auf einem Trägersystem am Finger aufgebracht werden können und auch den Benutzer bei der Interaktion mit einem Prüfobjekt wenig einschränken. Da kein Kontakt zum Objekt selbst besteht, muss aber sichergestellt sein, dass eine mechanische Verbindung zwischen dem Kontaktpunkt zum Prüfobjekt und dem Beschleunigungsaufnehmer besteht. Dies ist aber mit dem in 5.2.2 ausgewählten Kraftmessprinzip ohne Weiteres zu realisieren. Der Nachteil des Prinzips besteht darin, dass durch Messungenauigkeiten eine Drift in der ermittelten Position auftritt (zweifache Integration der Beschleunigung zum Ort) die über die Messzeit immer mehr ins Gewicht fällt. Weiterhin ist eine Kalibrierung bzw. eine Überprüfung der Genauigkeit vergleichsweise umständlich durchführbar, denkbar wäre hier ein Antasten von verschiedenen eindeutig definierten Positionen im Raum als Referenz.

Kriterien und Auswahl für ein Wegmesssystem

Für die Bewertung der einzelnen Messprinzipien und die Ermittlung eines zu verwendenden Prinzips werden nun folgende Kriterien angewendet:

- die messtechnische erreichbare *Genauigkeit* des Prinzips - hier gelten entsprechend die selben Ausführungen wie bei der Kraftmessung (vgl. 5.2.2).
- die *Kalibrierbarkeit* des Messsystems - die vorgestellten Messprinzipien sind nur zum Teil als kommerzielle Sensoren zur Wegmessung erhältlich, daher kann auch nicht implizit davon ausgegangen werden, dass eine Kalibrierung bereits vorliegt. Gerade bei Systemen, welche den Weg indirekt über andere physikalische Effekte bestimmen, ist aber eine Kalibrierung der Positionsmessung von entscheidender Bedeutung. Die Kalibrierung umfasst gegebenenfalls auch die Modellierung des Sensors, um aus dem Ausgangswert des sensitiven Elements eine Position als Ausgangswert zu erhalten.

- die *Anwendbarkeit* für unterschiedliche Prüflinge, *Freiheit* des menschlichen Testers und die Konstanthaltung des *Prüflingsverhaltens* folgen wieder den Kriterien aus 5.2.2
- der *Realisierungsaufwand* des Messsystems - unter dieses Kriterium fällt der Aufwand an zusätzlichen Entwicklungsarbeiten, gerade bei der Anwendung artfremder Messprinzipien oder dem Einsatz von Bildverarbeitungssystemen muss hier mit einem zusätzlichen Aufwand gerechnet werden. Dadurch steigt die Komplexität des Gesamtsystems und die Abschätzung von erzielbaren Ergebnissen wird schwieriger.

	Messaufbau	Laser-triangulation	Kamera-system	Näherungs-sensorik	Inertial-sensorik
Genauigkeit	+	+	+	0/-	-
Kalibrierbarkeit	0/-	+	+	-	0
Anwendbarkeit	0	0	0/+	0	+
Freiheit	-	+	+	+	+
Prüflingsverhalten	0/-	+	+	+	+
Realisierungsaufwand	0/+	0	0/-	-	+

Tabelle 5.2: Vergleich von Positionsmessprinzipien für die Haptikanalyse

Die in Tabelle 5.2 zusammengefasste Bewertung der unterschiedlichen Prinzipien für die Positionsmessung des beweglichen Schalterteils wurde wie folgendermaßen interpretiert: durch reines Auszählen der positiven und negativen Bewertungen würden das Triangulationsverfahren und der Einsatz eines Kamerasystems gleichauf liegen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Bewertungen bei der Anwendbarkeit und dem Realisierungsaufwand für ein Messsystem mit dem Triangulationsverfahren als Mittelwert über die Anwendungen zu sehen sind. Die Gruppe der Prüfobjekte, die mit einem solchen System überhaupt nicht vermessen werden können, ist im Vergleich zu den Einschränkungen, die bei einem Kamerasystem zu erwarten sind, überdurchschnittlich groß. Der Hauptnachteil beim Kamerasystem gegenüber dem Einsatz eines Triangulationssensors liegt in dem höheren Aufwand zur Realisierung eines Bildverarbeitungssystems. Daher fällt in diesem Fall die Wahl auf den Einsatz eines Kamerasystems, da durch den höheren Entwicklungsaufwand eine größere Flexibilität im Einsatz erkaufte werden kann, auch wenn möglicherweise die Genauigkeit hinter der eines Triangulationssensors zurückbleibt. Diese Entscheidung ist auch im Zusammenhang mit dem Abbildungsvermögen der menschlichen kinästhetischen Wahrnehmung zu sehen (vgl. 3.4.2).

Für die Erstellung eines Bildverarbeitungssystem wurde eine Kamera des Typs UI-1220-M des Anbieters IDS Imaging Development Systems verwendet. Diese Kamera liefert Grauwertbilder mit einer Auflösung von 752x480 Pixel bei einer Bildrate von bis zu 87fps. Die Kamera kann an einen Messrechner über die USB-Schnittstelle angeschlossen werden, was den Aufbau eines Bildverarbeitungssystems erleichtert, da keine spezielle Hardware verwendet werden muss. Der Hersteller liefert zu der Kamera bereits ein Software Development Kit (SDK), mit welchem die Kamera in eine Softwareumgebung zur Bildverarbeitung

eingebunden werden kann.

5.2.4 Integration von Beschleunigungssensorik

Da Inertialsensorik, wie bereits im vorangegangenen Kapitel geschildert, eine gewisse Eignung für die Positionsbestimmung des Messsystems aufweist, wurde nach einer geeigneten Lösung gesucht, die sich ebenfalls auf dem handgeführten System integrieren ließ. Da die grundsätzliche Messung allerdings durch das Kamerasystem vorgenommen werden sollte, wurde ein einfacher hochintegrierter Sensor ausgewählt, der eine interne Signalverarbeitung hat und durch ein einfaches Bussystem an die Signalverarbeitungshardware angebunden werden kann.

Eine solche Lösung stellt der Sensor LIS3LV02DQ von STMicroelectronics dar. Der Sensor ist als hochintegrierter Baustein verfügbar und verfügt über eine integrierte Datenverarbeitung. Die Messdaten können über den I^2C -Bus ausgelesen werden. Der Vorteil hierbei ist, dass mehrere verschiedene Sensoren in einem Datenerfassungssystem über dieses Bus verbunden werden können. Durch die Wahl des beschriebenen Sensors wurde die Erweiterbarkeit des Datenerfassungssystems offengehalten. Der Sensor selbst besitzt einen Messbereich von $\pm 2g$ bzw. $\pm 6g$, je nach Konfiguration des Sensors. Die Einstellung eines größeren Messbereichs verringert dabei allerdings Auflösung der Messwerte. Es sind einstellbaren Datenraten von bis zu $2560Hz$ verfügbar.

5.2.5 Mobiles Datenerfassungssystem

Für die Untersuchung durch einen menschlichen Tester sollte eine Lösung erarbeitet werden, die den menschlichen Tester möglichst wenig einschränkt und auch einen Einsatz in möglichst vielfältiger Umgebung zulässt. Dieser Aspekt spielt auch für die Auswahl einer Datenerfassungshardware eine Rolle. Zumindest die Kraftsensorik (siehe 5.2.2) als eine wesentliche zu erfassende Modalität muss im vorliegenden Fall direkt am handgeführten System integriert werden. Um auch andere Datenkanäle anbinden zu können und so eine Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit des Systems zu unterstützen, ist ein möglichst mobiles integriertes Erfassungssystem wichtig.

Die Anforderungen an das Datenerfassungssystem stellen sich wie folgt dar: zunächst einmal muss auf dem System ein ausreichend genauer Analog-Digital-Wandler vorhanden sein, denn die in 5.2.2 ausgewählte Kraftsensorik stellt den Messwert zunächst nur als elektrischen Widerstand bzw. eine Brückenspannung dar. Dieser Wandler muss auch in der Lage sein, Werte mit ausreichender Wert- und Zeitauflösung zur Verfügung zu stellen. Für die Synchronisierung mit den anderen Datenkanälen sollte eine Möglichkeit vorhanden sein, den Wandlungsvorgang zeitlich zu triggern.

Ähnlich wie der Analog-Digital-Wandler muss auch eine Möglichkeit gegeben sein, Werte im Erfassungssystem zeitlich synchronisiert erfassen und ablegen zu können. Gerade bei der Verwendung im Zusammenhang mit einem Kamerasystem zur Wegmessung ist dies von besonderer Wichtigkeit. Prinzipiell wird das Gesamtsystem hier nämlich in zwei voneinander zumindest teilweise getrennte Systeme zerfallen. Beide Systeme müssen aber über eine Echtzeituhr und eine Synchronisierungsmöglichkeit verfügen, damit die Daten in einem späteren Schritt einander zugeordnet werden können.

Einen Vorteil für ein mobiles Datenerfassungssystem stellt ein integrierter Speicher für aufgezeichnete Messwerte dar. Können Werte synchronisiert mit externen Aufzeichnungsmo-

dalitäten erfasst werden, ist es so möglich, die Daten erst zu einem späteren Zeitpunkt zu übertragen. So kann auf eine ständige Verbindung des Erfassungssystems mit einem externen Rechner verzichtet werden, was die Freiheit des Nutzers und die Einfachheit bei der Verwendung erhöht.

Für die Anbindung weiterer Sensoren sollen typische Erweiterungsschnittstellen vorhanden sein. Der ausgewählte Beschleunigungssensor hat beispielsweise eine Schnittstelle nach dem I²C-Standard, welcher bei integrierten Sensormodulen weit verbreitet ist.

Schließlich besteht noch die Anforderung, dass das zu verwendende System eine ausreichende Verarbeitungsleistung für die Aufgaben der Datenerfassung und die Bedienung der Erweiterungsschnittstellen aufweisen muss. Eine einfache Erweiterbarkeit und möglichst modulare Software auf dem System selbst ist ebenfalls wünschenswert. Optional könnte auch die Übertragung der bereits mit Zeitstempeln versehenen Werte integriert werden. Dies würde die Mobilität weiter erhöhen und so zu einer einfachen Handhabbarkeit beitragen.

Aus den geschilderten Anforderungen wurde geschlossen, dass der Einsatz einer selbstentwickelten Hardwareplattform die naheliegendste Lösung ist. Zum Einen besteht so eine besonders gute Möglichkeit auf die unterschiedlichen Anforderungen zu reagieren und zum Anderen wurde der Entwicklungsaufwand für ein solches Datenerfassungssystem geringer eingeschätzt als der Anpassungsaufwand eines bestehenden Systems. Das Kardwarekonzept basiert auf einem Mikrocontroller aus der AVR-Familie von Atmel, diese 8bit-Mikrocontroller weisen eine Vielzahl an Erweiterungsschnittstellen auf und besitzen für die angedachte Datenerfassung eine ausreichende Prozessorleistung. Sie verfügen auch über eine gewisse Menge internen Speicher und können bei Bedarf durch einen externen Speicherbus um ein größeres Speichervolumen erweitert werden. Des Weiteren weisen sie einen geringen Energieverbrauch auf und sind ohne speziellen Hardwareaufwand auf einem kleinen mobilen System integrierbar. Weitere Hardwarekomponenten umfassen einen Analog-Digital-Wandler sowie Schnittstellentreiber. Beim Entwurf der Hardware wurde darauf geachtet, möglichst viele Schnittstellen nutzbar zu machen, um so auf spätere Änderungen leichter reagieren zu können. Die auf dem System vorhandenen Möglichkeiten zur Programmierung und Fehlersuche direkt im System (ISP und JTAG) wurden ebenfalls berücksichtigt.

5.2.6 Integration der Komponenten zu einem handgeführten Sensorsystem

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Komponenten wurden zu einem Sensorsystem zusammengestellt, dessen Struktur in Abbildung 5.4 skizziert ist.

Die Realisierung des Fingeraufsatzes (Abb. 5.5a) besteht dann aus einem Fingerschiene aus Kunststoff und einer Platine (Abb. 5.5b) mit dem Mikrocontroller, die bei einem Test am Arm getragen werden kann. Für die Tests wird noch das Bluetooth-Modul und eine mobile Energieversorgung verwendet.

Die gezeigten Systemteile stellen ein prototypisches System dar, welches allerdings alle vorgestellten Komponenten in sich vereint. Ein professionelle Umsetzung als Produkt würde mit einer weiteren Integration und auch Miniaturisierung einhergehen. Dieser eher technische Umsetzungsaufwand wurde hier nicht betrieben, die technische Umsetzbarkeit und Verwendbarkeit kann auch mit dem vorliegenden System überprüft werden.

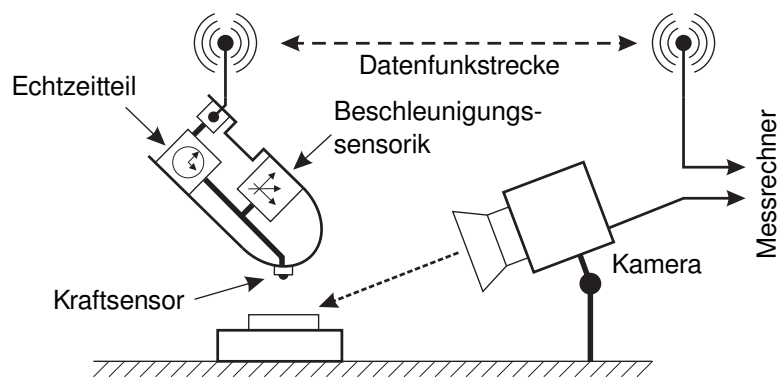
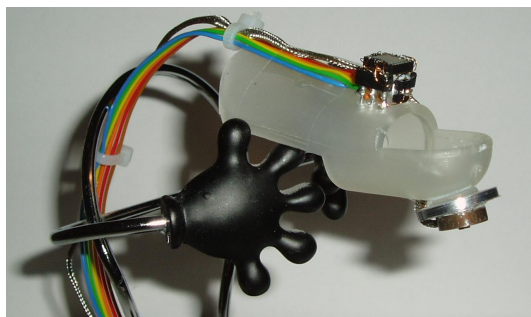
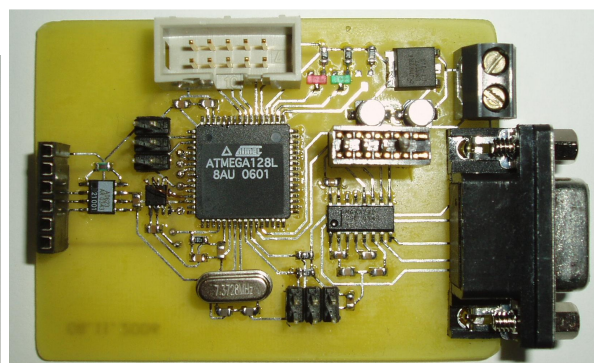


Abbildung 5.4: Struktureller Aufbau des Messsystems



(a) Fingeraufsatz mit Sensorik



(b) Prototypen-Platine für die Signalverarbeitung

Abbildung 5.5: Fingeraufsatz und Platine für die Signalverarbeitung

5.3 Messsystem für die technische Haptikuntersuchung

Für eine technische Prüfung eines Schalters gelten Anforderungen, die von einem Analyse-system mit einem menschlichen Tester abweichen. So wird die technische Prüfung alleine von einem automatisierten System durchgeführt und muss daher keine Rücksicht auf die Einschränkung eines menschlichen Testers nehmen. Auf der anderen Seite werden höhere Anforderungen an die Durchführung der einzelnen Tests gestellt, was die Zeitdauer bei der Versuchsvorbereitung angeht und auch die messtechnische Genauigkeit muss für eine Interpretation der Daten höher als bei einem Test durch den Menschen sein. Dieser Abschnitt ist wie folgt gegliedert: zunächst werden die speziellen Aspekte bei einer technischen Untersuchung diskutiert und daraus die Anforderungen an ein technisches System abgeleitet. Im Anschluss werden dann die Komponenten der technischen Umsetzung kurz beschrieben und deren Einsatz begründet. Ein kurzer Überblick über das Gesamtsystem schließt die Betrachtung zum technischen Untersuchungssystem ab.

5.3.1 Spezielle Aspekte bei der technischen Untersuchung

Die Anforderungen an ein geeignetes technisches System zur Untersuchung haptischer Eigenschaften von Schaltern sind von Aspekten geprägt, welche aus dem Einsatz in einem Produktionsumfeld (bzw. Prüfumfeld) resultieren. Auf der anderen Seite existieren auch

einige Einschränkungen im Vergleich mit der menschlichen Untersuchung nicht.

Die wichtigste Anforderung an ein technisches Untersuchungssystem ist eine möglichst hohe messtechnische Genauigkeit. In der Untersuchung von haptischen Bedienelementen allgemein und speziell bei Schaltern müssen hier der Betätigungsweg und die Betätigungskraft möglichst genau aufgezeichnet und dokumentiert werden. So können mit einer Anlage sowohl die haptischen Eigenschaften eines Elements untersucht werden und gleichzeitig auch vom Hersteller eines Bedienelements die Produktion überwacht werden. Besonders bei der Herstellung von Schaltern und vergleichbaren Elementen werden den Herstellern teils sehr genaue Vorgaben von den Abnehmern gemacht, was die Kraft-Weg-Kennlinie der Elemente angeht. Wenn das Prüfsystem eine entsprechende messtechnische Genauigkeit aufweist, kann es auch für Dauerbelastungstests und vergleichbare Aufgabenstellungen verwendet werden.

Die zweite Anforderung an ein technisches System für den Einsatz in einem Produktionsumfeld ist eine möglichst leichte Integrierbarkeit in die Herstellungs- bzw. Prüfumgebung. Diese Integrierbarkeit umfasst wiederum verschiedene Aspekte. Grundsätzlich ist hier die Reihenprüfung und die Stichprobenuntersuchung zu unterscheiden - die Reihenprüfung unterwirft jede hergestellte Einheit einer Prüfung und entscheidet, ob die untersuchte Einheit die geforderten technischen Parameter einhält oder ob diese abgelehnt werden muss. Eine Reihenprüfung ist allerdings bei einem hohen Produktionsvolumen oder bei erhöhtem Aufwand der Prüfprozedur schwer zu realisieren. Daher kommt die Reihenprüfung meist bei vergleichsweise einfach überprüfbareren Eigenschaften oder auf der anderen Seite bei Komponenten mit höherem Einzelpreis zum Einsatz. Ein weiteres Argument für eine Prüfung jeder einzelnen Einheit kann die Sicherheitsrelevanz der produzierten Komponente sein. Allerdings wird dieses Argument bei der Untersuchung haptischer Eigenschaften eine eher untergeordnete Rolle spielen, für die Sicherheit ist eher die Funktion des Elements an sich von Interesse. Die Untersuchung der haptischen Eigenschaften wird in den meisten Fällen als Stichprobenuntersuchung durchgeführt. Diese wählt in regelmäßigen Abständen produzierte Einheiten aus und führt diese unabhängig vom Produktionsfluss einer Untersuchung zu. Für beide Methoden muss nun die Untersuchung der haptischen Eigenschaften möglichst einfach durchführbar sein. Zunächst muss der Aufwand für die Einrichtung eines Tests einer einzelnen Einheit gering sein. Eine mechanische Veränderung des zu untersuchenden Elements ist für den Reihentest prinzipiell nicht möglich, für die Stichprobenuntersuchung zumindest von Nachteil, da die modifizierten Einheiten in der Regel nicht mehr verkauft werden können. Ebenfalls ist die Montage in einer komplizierten Untersuchungseinrichtung hinderlich. Der Untersuchungsvorgang selbst soll möglichst schnell durchführbar sein, um eine hohe Anzahl von Einheiten untersuchen zu können. Wünschenswert ist auch eine möglichst einfache Bedienbarkeit der Prüfanlage, was allerdings auf die Integration in bestehende Informationssysteme und die Entwicklung eines Bedienkonzepts abzielen würde. Dies ist aber nicht Gegenstand der Betrachtungen in dieser Arbeit, sondern vielmehr eine technische Entwicklungs- und Implementierungsfrage. Für ein industriell einsetzbares System ist auch eine möglichst hohe Wiederholgenauigkeit des Prüfvorgangs an sich wichtig. Da die Eigenschaften der Schalter sich bei einer Veränderung des Prüfvorgangs durchaus anders darstellen können, muss die Ausführung der Prüfung möglichst immer gleich sein. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von verschiedenen Prüfungen kann auf diese Art ebenfalls verbessert werden. Allerdings ist es speziell für die gestellte Aufgabe der Haptikuntersuchung von Schaltern wichtig, dass das Untersuchungssystem prinzipiell in der Lage ist, den Prüfling so zu akтуieren, wie dies

auch der Mensch tut. Anderenfalls kann es sein, dass einem wichtige Eigenschaften des Schalters entgehen. Das Messsystem soll eben nicht nur mit hoher Genauigkeit eine Kraft-Weg-Kennlinie aufzeichnen können, sondern Daten ermitteln, die für die Analyse der haptischen Eigenschaften geeignet sind.

5.3.2 Antriebssystem

Das technische System für die Haptikuntersuchung greift nicht auf den Menschen als aktiven Tester zurück und muss daher über ein Antriebssystem verfügen. Für die Aufgabenstellung der Schalteruntersuchung wird ein Antriebssystem gesucht, welches eine lineare Bewegung durchführen kann. Diese Bewegungen müssen mit einer angemessenen Dynamik (Positioniergenauigkeit, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) durchgeführt werden. Die für die Aktuierung der Schalter notwendigen Kräfte sollen ebenfalls während der Bewegungen aufgebracht werden können. Speziell für die Untersuchung haptischer Eigenschaften mit gleichzeitiger Kraftmessung ist es wichtig, dass Vibrationen im Antriebssystem vermieden werden. Vor allem Vibrationen in Bewegungsrichtungen können bei der Verwendung eines sehr steifen Kraftaufnehmers zu einer starken Beeinträchtigung des Messergebnisses führen. Für die Eingrenzung der möglichen Antriebskonzepte wurden nur Antriebssysteme betrachtet, welche ohne größeren mechanischen Aufbau eine lineare Bewegung durchführen können. Dies wäre nur nötig gewesen, wenn die untersuchten Systeme Defizite aufgewiesen hätten, die einen Einsatz effektiv verhindert hätten. Folgende Prinzipien wurden in die nähere Auswahl genommen: Spindelgetriebe, pneumatische Antriebe und lineare elektrische Direktantriebe.

Schraubengetriebe

Schraubengetriebe werden als Maschinenelement dazu verwendet, Drehbewegungen in translatorische Bewegungen umzuwandeln. Als Antrieb käme in diesem Fall ein elektrischer Motor zum Einsatz. Der Vorteil eines solchen Schraubenantriebs ist die sehr hohe erreichbare Genauigkeit in der Positionierung bei gleichzeitig sehr hohen aufbringbaren Kräften. Des Weiteren reagiert ein Spindeltrieb auch auf schlagartige Änderungen von einwirkenden Kräften nicht durch große Veränderungen in der Position. Ein möglicher Nachteil für die gestellte Aufgabe liegt in der erreichbaren Dynamik - auch wenn mit einigen Systemen sehr hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erreicht werden können, bleiben Schraubenantriebe doch hinter den anderen betrachteten Systemen zurück.

Pneumatische Aktoren

Für lineare Bewegungen sind pneumatische Aktoren, hier Pneumatikzylinder, eine attraktive Realisierungsmöglichkeit. Die lineare Bewegung wird hier direkt durch Einleiten von Luft in eine der Kammern erzeugt und kann mit geeigneten Regelungssystemen sehr genau kontrolliert werden. Die benötigten Kräfte für die Untersuchung von Schaltern sind ebenfalls prinzipiell mit einem Pneumatikaktor erreichbar. Der Vorteil dieses Prinzips liegt hier in einer relativ hohen erreichbaren Dynamik und der direkten Erzeugung einer linearen Bewegung, die angesprochenen Vibrationen sind hier ebenfalls kein Problem. Die Problematik in der gegebenen Aufgabenstellung liegt darin, dass ein Pneumatikaktor prinzipiell auf eine schlagartige Änderung der einwirkenden Gegenkraft durch eine Positionsänderung

reagiert. Das kann zur Folge haben, dass beispielsweise der Schalterpunkt eines Prüflings nicht genau entlang eines vorgegebenen Wegprofils abgefahren kann.

Lineare elektrische Direktantriebe

Als drittes untersuchtes Antriebskonzept wurden elektrische lineare Direktantriebe betrachtet. Bei einem solchen Antrieb sind auf dem beweglichen Läufer Permanentmagnete aufgebracht, die ein konstantes Magnetfeld zur Folge haben. Im ruhenden Stator befinden sich nun elektrische Wicklungen mit denen ein veränderliches Feld erzeugt werden kann. Das Magnetfeld des Läufers richtet sich dann am Magnetfeld des Stators aus und durch eine Änderung des Magnetfelds im Stator kann eine Bewegung des Läufers erzeugt werden. Ein solcher Motor benötigt allerdings ein ausreichend schnelles Regelungssystem für die dynamische Einstellung eines magnetischen Felds. Vorteilhaft bei den besprochenen Antrieben ist die sehr hohe erreichbare Positionierungsgenauigkeit bei gleichzeitig sehr hoher Dynamik. Die erreichbaren Kräfte bleiben zwar im Allgemeinen hinter den mit Spindelgetrieben erzeugbaren zurück, sind aber für die Aufgabenstellung in jedem Fall ausreichend. Den Positionsänderungen in Reaktion auf veränderliche einwirkende Kräfte kann durch geeignete Einstellung eines Reglers begegnet werden. Nachteilig ist bei diesem Konzept die Notwendigkeit, einen vergleichsweise komplexen Regler verwenden zu müssen, hier muss auch besonders darauf geachtet werden, dass nicht durch Aktivitäten des Reglers Schwingungen entstehen.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen wurde entschieden, einen elektrischen Direktantrieb für die Realisierung eines technischen Untersuchungssystems zu verwenden. Dieser bietet im Vergleich zu den anderen betrachteten Antriebskonzepten den geringsten apparativen Umsetzungsaufwand und ist gleichzeitig in der Lage, einen weiten Dynamikbereich abzudecken.

Zum Einsatz kommt ein servoelektrischer Lineardirektantrieb des Typs M LD100K von Schunk. Dieser bietet zusammen mit dem verwendeten Antriebsregler Harmonica von Elmo Motion Control bei weitem ausreichende Reserven für die Verwendung im technischen Untersuchungssystem für Schalter, sowohl für das Abfahren von Trajektorien, die der Mensch mit seinen Bewegungen erzeugt, als auch für die Verwendung als reines technisches Prüfsystem. Einige relevante Kenndaten des Antriebs sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Parameter	Wert
maximale Antriebskraft	150N
Nennkraft	50N
maximale Geschwindigkeit	$5 \frac{m}{s}$
maximale Beschleunigung	$40 \frac{m}{s^2}$
Wiederholgenauigkeit	0,01mm
Messsystemauflösung	0,5µm

Tabelle 5.3: Technische Daten des Lineardirektantriebs M LD 100K

Die absolute Positioniergenauigkeit des Systems aus Antriebsregler und Antrieb wurde durch Protokollierung der Messwerte vom Wegmesssystem überprüft, bei einer senkrechten Montage des Antriebs wird im Stillstand der Antrieb so ausgegelt, dass am Messsys-

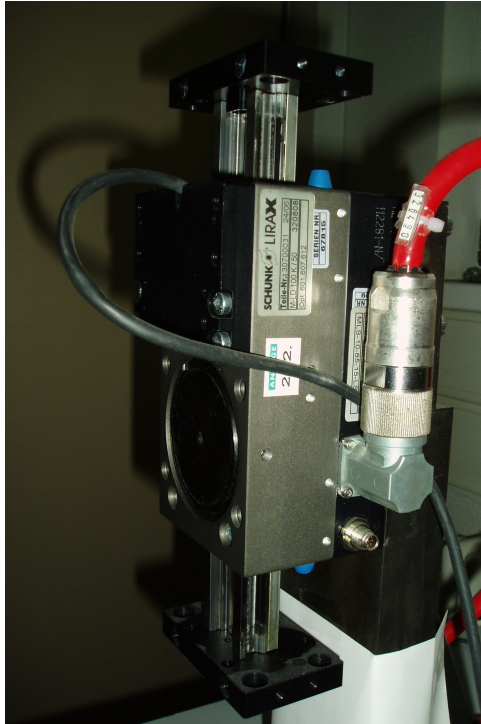


Abbildung 5.6: Elektrischer linearer Direktantrieb ML D-100K

tem keine Änderungen festzustellen sind. Geht man nun davon aus, dass das Messsystem nicht selbst fehlerhaft ist, kann die Ausregelgüte so bewertet werden. Es traten auch bei der Verwendung des Reglers keine am Läufer messbaren Schwingungen im ausgeregelten Zustand mehr auf. Dies ist besonders bei der Verwendung von steifen Kraftsensoren am Antrieb sehr wichtig, da Schwingungen des Antriebs auch Schwingungen im Sensor anregen können, die dann wiederum das Messergebnis der Kraftmessung unbrauchbar machen können.

5.3.3 Sensorik für die technische Prüfung

Auch für die technische Prüfung wird eine Messung von Betätigungskraft und Betätigungsweg benötigt. Die Auswahl geeigneter Konzepte ist in diesem Fall allerdings wesentlich einfacher zu treffen als bei der Sensorik für das System zur menschlichen Haptikuntersuchung. Wie auch beim Antriebssystem stehen hier mehr technische Gesichtspunkte im Vordergrund. Aus der Auswahl eines elektrischen Direktantriebs kann auch sofort auf das Wegmesssystem geschlossen werden, dieses ist Bestandteil des Antriebs und wird zur Positionsregelung desselben verwendet. Das System im Antrieb basiert auf einem optischem inkrementellen Wegaufnehmer mit Referenzierung am Rand des Messbereichs. Das System ist fest auf dem Läufer des Antriebs angebracht und die Ausgangswerte können vom verwendeten Regler sowohl direkt ausgelesen als auch intern gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verarbeitet werden. Verwendet man nun im weiteren Aufbau eine steife Verbindung zwischen dem Läufer des Motors und dem beweglichen Schalterteil, kann der aktuelle Betätigungsweg somit durch eine einmalige Referenzmessung sicher bestimmt werden. Durch eine solche Vorgehensweise kann das Antriebssystem so auch

für die Funktionsüberprüfung des in 5.5.6 diskutierten Bildverarbeitungssystems verwendet werden.

Das Wegmesssystem im Antrieb basiert auf einer optischen Vermessung des Strichmusters auf einem bewegten Maßstab. Das Strichmuster wird von zwei versetzt angebrachten optoelektronischen Bauelementen beobachtet und der gemessene Weg kann an einem digitalen Ausgang abgenommen werden. Das Messsystem selbst erlaubt, wie in Tabelle 5.3 bereits dargestellt, Wegmessungen mit einer Auflösung von bis zu $0,5\mu\text{m}$. Allerdings stellt das verwendete Messsystem nicht ohne Weiteres einen Absolutwert bei der Wegmessung zur Verfügung. Diesem Umstand wird allerdings so begegnet, dass ein zusätzlicher Schaltausgang des Messsystems über eine Referenzmarkierung eine bestimmte Stellung des Antriebs referenzieren kann. Für die Regelung auf einen absoluten Positionswert wird also beim Einschalten des Antriebs eine Referenzfahrt bis zur Markierung durchgeführt, dieser Vorgang kann über den Antriebsregler auch automatisiert durchgeführt werden.

Für die Auswahl eines Kraftmesssystems müssen nun zwei Faktoren in die Betrachtungen einbezogen werden: zum Einen muss die messtechnische Genauigkeit des Systems ausreichend hoch sein (3.4.2) und zum Anderen muss das Messsystem auch eine möglichst hohe Steifigkeit aufweisen, um das Wegmesssystem des Antriebs für die Positionsmessung des beweglichen Schalterteils mitverwenden zu können. Beide Forderungen werden bereits durch die Verwendung einer Miniaturwägezelle, wie in 5.2.2 beschrieben, erfüllt. Zudem ist es zweckmäßig für eine gute Vergleichbarkeit der Werte aus menschlicher und technischer Prüfung das gleiche Sensorsystem zu verwenden. Der Realisierungsaufwand wird ebenfalls durch eine Mehrfachnutzung verringert. Im Folgenden wurde also für die Kraftmessung mit dem technischen System auf die gleiche Kraftsensorik zurückgegriffen wie bei der menschlichen Untersuchung.

Die Anbindung des Wegmesssystems wurde durch ein weiteres Softwaremodul im Datenerfassungsframework realisiert, die Anbindung der Kraftsensorik war durch die Wiederverwendung des Erfassungssystems bereits vorhanden. Die Anpassungen betrafen hier lediglich einen Verzicht auf eine Funkübertragungstrecke und eine Veränderung der Synchronisierungslogik zwischen dem Positionsmesssystem und dem Antriebssystem, welches wiederum die Wegmessung im Antrieb triggert.

5.4 Software für die Datenerfassung

Für die Datenerfassung mit dem menschgeführten System und mit dem technischen Untersuchungssystem wird ein passendes Softwaresystem benötigt. Dieses System soll die ausgewählten Sensorsysteme und die Verarbeitungshardware mit einander verbinden und eine einheitliche Lösung für die verschiedenen Hardwareplattformen bei den unterschiedlichen Testmodalitäten anbieten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu ein modulares Softwaresystem entwickelt und implementiert. Im Folgenden werden die Anforderungen diskutiert, die an ein solches System durch die Aufgabe gestellt werden und daraus eine angemessene Lösung entwickelt. Nach einer Beschreibung der grundlegenden Struktur werden die einzelnen Teile des Softwaresystems vorgestellt und deren Einsatz im Datenerfassungssystem gezeigt.

5.4.1 Anforderungen an die Software zur Datenerfassung

Für die Entwicklung einer Softwarelösung wurden zunächst die notwendigen Anforderungen zusammengestellt, um die Anwendbarkeit von verfügbaren Lösungen zu untersuchen und ein möglichst passendes System auszuwählen. Die Kernanforderungen sind im Folgenden kurz erläutert.

Die grundlegende Anforderung ist die Erforderlichkeit einer Echtzeitdatenerfassung. Dabei ist es nicht nur wichtig, die Daten von den Sensorsystemen überhaupt zu erhalten, sondern auch die zeitliche Anordnung dieser Daten zu protokollieren. Zu jedem erfassten Datum von einem Sensor gehört auch ein Zeitstempel, welcher den Zeitpunkt der Aufnahme dieses Datums beschreibt. Werden mehrere Sensorsysteme verwendet, so müssen diese auch untereinander zeitlich synchronisiert werden. Dies lässt sich auf einem integrierten Datenerfassungssystem durch gemeinsame Signalleitungen zum Start einer Messwertaufzeichnung (Triggerung) lösen, die angestrebte Lösung soll allerdings auch in der Lage sein, Datenerfassungssysteme zu synchronisieren, die nicht auf einer einzigen Hardwareplattform integriert sind. Im Fall des Haptikanalysesystems für Schalter befinden sich zumindest die verschiedenen Erfassungssysteme für Kraft und Betätigungsweg auf unterschiedlichen Hardwareplattformen, nämlich dem Mikrocontrollersystem und einem PC mit angeschlossener Kamera. Diese beiden Erfassungssysteme müssen untereinander synchronisiert werden, um im Nachhinein die erfassten Daten zeitlich einander zuordnen zu können.

Des Weiteren muss eine Softwarelösung auch in der Lage sein, ohne größeren Aufwand die verschiedenen verwendeten Sensorsysteme anzubinden. Diese Forderung ist insofern nicht trivial, da die verschiedenen Sensorsysteme unterschiedliche Anschlussarten an ein Datenerfassungssystem aufweisen. Auch für die Wahrung einer einfachen Erweiterbarkeit ist es notwendig, möglichst eine standardisierte Softwareschnittstelle zu schaffen, die dann für die verschiedenen Sensorsysteme implementiert werden kann. Eine monolithische Lösung zur Verbindung mit den speziellen verwendeten Sensoren kann zwar leichter entwickelt und schneller implementiert werden, dies läuft allerdings der Idee zuwider, möglichst Komponenten zu entwickeln, die auch für andere Datenerfassungssysteme wiederverwendet werden können.

Um den Hardwareaufwand möglichst gering zu halten, sollte das Softwaresystem zur Datenerfassung selbst möglichst einen geringen Rechenaufwand erzeugen. Speziell bei der Verwendung auf einem Mikrocontroller in einem mobilen System spielt diese Anforderung eine wichtige Rolle, da höhere Rechenleistung zumindest mit einem erhöhten Energieverbrauch, im allgemeinen aber auch mit komplexerer Hardware erkaufte werden muss. Für das Grundsystem der angestrebten Softwarelösung ist es auch wünschenswert, dass sie grundsätzlich für verschiedene Hardwareplattformen eingesetzt werden kann. Dies kann dadurch erreicht werden, dass hardwarespezifische Funktionalitäten wiederum in Modulen gekapselt wird, die dann je nach Einsatzzweck ausgetauscht werden.

Wie schon in den vorangegangenen Punkten angesprochen, soll die Softwarelösung eine modulare Struktur aufweisen, die auf einem Grundsystem aufbaut. Dadurch wird eine Vielzahl an Applikationen mit dieser Lösung erschließbar. Besonders im Hinblick auf die Erweiterung und nötige Veränderungen des Gesamtsystems zur Haptikanalyse für andere Bedieneinrichtungen als Schalter ist dies eine wichtige Forderung, da durch das hier vorgestellte System nicht nur eine spezielle Aufgabenstellung gelöst werden soll, sondern auch die Grundlagen für weitere Untersuchungen gelegt werden sollen.

5.4.2 Struktur der entwickelten Softwarelösung

Ausgehend von den im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Anforderungen wurde ein modulares Softwaresystem konzipiert und implementiert, welches Daten in einem verteilten Sensorsystem erfassen kann und dabei einen möglichst geringen Rechenaufwand erzeugt. Die entwickelte Lösung basiert auf einer Kernanwendung, welche durch Erweiterungsmodule mit verschiedenen Sensorsystemen verbunden werden kann. Das Grundmodul verwaltet nun verschiedene Messaufgaben und legt die erfassten Ergebnisse ab. Auch die Kommunikation zu anderen Systemen, welche ein solches Grundmodul implementieren, ist durch Erweiterungsmodule realisiert, sodass eine Vielzahl von Schnittstellen nutzbar ist. Das gesamte System ist dabei aber kein Echtzeitbetriebssystem, es leistet die Echtzeitverwaltung durch Zustandsänderungen der einzelnen Aufgaben.

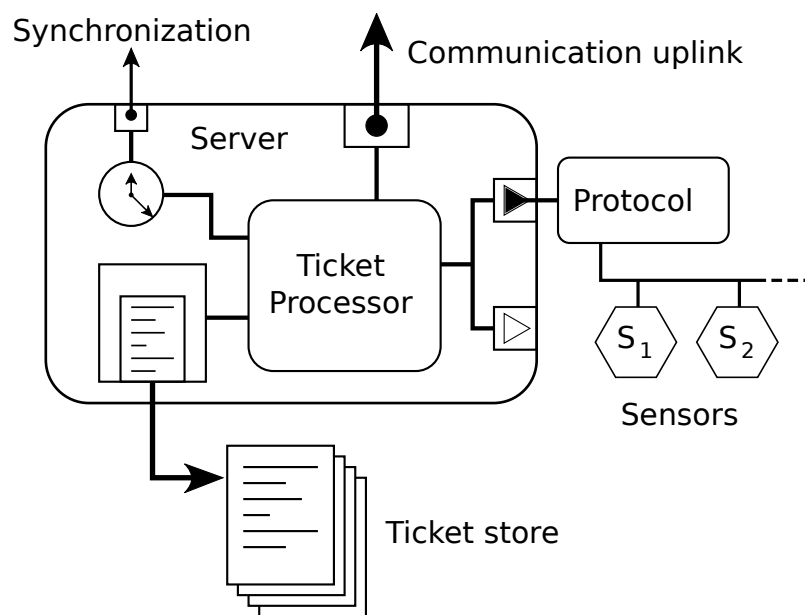


Abbildung 5.7: Modulares Konzept der Software zur Datenerfassung

Bei der Konzeption der Kernanwendung mit ihren Funktionalitäten wurden darauf geachtet, nicht eine spezielle Hardware zu adressieren oder Implementierungsframeworks zu verwenden, die unter Umständen auf einer anderen Hardware nicht verfügbar sind. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um eine Wiederverwendbarkeit des Implementierungscodes auf verschiedenen Plattformen zu gewährleisten - dies war auch eine der Anforderungen, die im Vorfeld gestellt wurden. Die verschiedenen Erweiterungsmodule für Protokolle und Sensoren sind im Allgemeinen dann auf bestimmte Systemumgebungen zugeschnitten und nur unter diesen lauffähig, diese Schicht passt dann das Grundsystem an eine spezifische Hardware an. Durch die Verwendung von konfigurierbaren Messaufgaben wird allerdings die zu erfüllende Messaufgabe nicht bereits im Vorfeld durch die Implementierung festgelegt. Die Messaufgaben, die auf dem System verwaltet werden, sind so beschaffen, dass sie auch zur Laufzeit des Systems erstellt, konfiguriert und gelöscht werden können. Speziell in eingebetteten Systemen stellt dies einen großen Fortschritt gegenüber Software dar, die auf eine bestimmte Aufgabenstellung zugeschnitten ist. Änderungen an der Anwendungssoftware gehen in eingebetteten Systemen oft mit einer Neuprogrammierung

des Systems einher, welche zeitraubend und im laufenden Betrieb unpraktisch, wenn nicht unmöglich ist.

Bei der weiteren Beschreibung des Softwarekonzepts werden einige Begriffe für die einzelnen Komponenten der Software verwendet, die nun im Voraus definiert werden:

- *Ticket Server* - dies ist das Grundmodul, welches die Funktionalität des Ticket Processors sowie die Schnittstellen für Protokoll PlugIns, Kommunikationssystem und die Ticket-Speicherung bereitstellt.
- *Ticket Processor* - innerhalb des Ticket Servers wickelt der Ticket Processor die, in den Tickets realisierten, Messaufgaben ab, stellt Zeitstempel für die Daten zur Verfügung und verwaltet die Aktivierung der Protokoll PlugIns.
- *Ticket* - die Tickets charakterisieren Datenerfassungsaufgaben und sind auch in der Lage, Konfigurationsarbeiten an den Schnittstellen durchzuführen. Die Tickets selbst implementieren dabei nicht die benötigte Funktionalität, sie steuern den Ablauf durch Speicherung eines internen Zustands und nehmen die Messdaten, die über die angeschlossenen Sensoren erfasst werden, auf.
- *Ticket Service Function* - diese Teile des Softwarekonzepts implementieren die, zu verschiedenen Tickets gehörigen, Funktionalitäten. Sie generieren aus den Daten in den Tickets neue Zustandsübergänge der Tickets selbst und sprechen die Schnittstellenfunktionen der Protokoll PlugIns an.
- *Protokoll PlugIn* - die Protokoll PlugIns binden verschiedene Sensoren an den Ticket Server an. Sie realisieren die Kommunikation mit den jeweiligen Sensorsystemen und sind auch für die Verwaltung von vorhandenen Sensorbussystemen verantwortlich.

5.4.3 Komponenten des Softwaresystems zur Datenerfassung

Im Folgenden werden die Komponenten des entworfenen Softwaresystems zur Datenerfassung beschrieben. Hierbei wird die zu implementierende Funktionalität der einzelnen Komponente und deren Schnittstellen zu den anderen Teilen des Systems beschrieben, die Realisierung von Funktionalitäten des Gesamtsystems und die Verwendung des implementierten Systems für die Datenerfassung im Messsystem für die Haptikanalyse sind Gegenstand der darauffolgenden Abschnitte.

Übergreifend für die Beschreibung aller Komponenten des Softwaresystems muss hier noch einmal die Betrachtung des Systems als Pseudo-Multitasking-System betrachtet werden. Das System ist in der Lage, mehrere Datenerfassungsprozesse zur gleichen Zeit zu betreuen, auch wenn sich diese zeitlich überschneiden. Typischerweise wird dieses Problem durch ein Echtzeitbetriebssystem geleistet, welches dann für die einzelnen Aufgaben verschiedene Tasks zur Verfügung stellen würde. Allerdings macht ein Echtzeitbetriebssystem keine Annahmen über die Komplexität der einzelnen Aufgaben, also muss der gesamte Kontext eines Tasks bei einem Taskwechsel gesichert und zum Zeitpunkt der Fortsetzung wieder geladen werden. Dieses Vorgehen verbraucht allerdings Rechenzeit und auch Speicher. Das hier vorgestellte System löst daher das Verwaltungsproblem folgendermaßen: die verschiedenen Tickets führen nur jeweils Zustandsänderungen durch die zugeordnete Ticket Service Funktion aus, auch die Protokoll PlugIns sind lediglich zustandsgesteuert. Diese Vorgehensweise reduziert das Sichern und Wiederherstellen des Ticket- oder Protokoll-Kontextes

auf einen einzigen Zustand. Zusätzlich benötigte Daten für die einzelnen Vorgänge können allerdings auch in den Tickets oder Protocol Control Blocks gespeichert werden.

Die Ausführung des gesamten Softwaresystems kann dann über den Ticket Server gesteuert werden und ist sowohl in einer Einzel-Task-Umgebung als auch auf einer Multitasking-Umgebung einsetzbar. Wird für andere Zwecke schon ein Echtzeitbetriebssystem auf der Hardwareplattform ausgeführt, kann das gesamte Datenerfassungssystem in einen einzigen Task integriert werden. Dies erleichtert auch eine Integration des Datenerfassungssystems in bestehende Steuersysteme.

Ticket Server

Der Ticket Server stellt das Grundgerüst des Softwaresystems dar, für den Einsatz auf verschiedenen Hardwareplattformen abstrahiert dieses Grundgerüst die weiteren Funktionen von der Hardware oder einem eventuell vorhandenen Betriebssystem. Um das Softwaresystem im Weiteren auch ohne vorhandene Betriebssysteme betreiben zu können, muss daher der Ticket Server auch einige Funktionen eines solchen Betriebssystems übernehmen. Der Ticket Server wird bei einer Implementierung als Datenobjekt und eine Bibliothek von Schnittstellenfunktionen realisiert. Der Zugriff auf Funktionalitäten innerhalb des Systems geschieht ebenfalls über das API (application programming interface) des Ticket Servers, Anwendungen können beispielsweise über die Instanzierung von Tickets Aufgaben vom Ticket Server durchführen lassen.

Die wichtigste Systemfunktion ist hierbei die Verwaltung von zur Verfügung stehendem Speicher, der von weiteren Modulen im Softwaresystem benötigt wird. Die Speicherverwaltung beschränkt sich hierbei allerdings auf die Verwaltung von internen Listen, wird bei der Funktionsausführung Speicher benötigt, welcher danach wieder freigegeben werden kann, so muss dies in der Funktionsimplementierung gelöst werden. Der Ticket Server verwaltet drei interne Datenspeicher für: aktive Tickets, Protocol Control Blocks und zur Zwischenspeicherung von Messwerten. Die aktiven Tickets und Protocol Control Blocks sind dabei jeweils in Listen abgelegt, gespeicherte Messdaten können vom Ticket Server je nach Implementierung entweder in Listen, blockorientiert oder in einem Ringspeicher abgelegt werden. Bei den gespeicherten Messdaten ist ein wahlfreier Zugriff wie bei Tickets oder Protocol Control Blocks nicht notwendig, da sie lediglich für eine Übertragung an ein übergeordnetes System bzw. in eine Verarbeitung zwischengespeichert werden. Eine Verarbeitung der Messdaten ist im Rahmen des hier beschriebenen Softwarekonzepts nur eingeschränkt vorgesehen, eine solche Erweiterung kann allerdings zu einem beliebigen Zeitpunkt vorgenommen werden, sofern auch genügend Rechenleistung auf dem lokalen System zur Verfügung steht. Weitere interne Listen und Speicherobjekte für den Ticket Processor werden ebenfalls vom Ticket Server angelegt, deren Verwaltung wir dann allerdings dem Ticket Processor überlassen.

Die zweite wichtige Systemfunktionalität ist die Aktivierung des Ticket Processors als Prozess. Da auch der Ticket Processor nicht als eigener Task ausgeführt wird, sondern als Funktion, muss dieser regelmäßig aktiviert werden. Hierzu wird dann vom Ticket Server entweder eine Funktionalität der Hardware (Timer-Interrupts) oder eines unterlagerten Betriebssystems (Zeitgeber, Echtzeittask) verwendet. Durch die Wahl der Aktivierung kann die Reaktionszeit des Systems eingestellt werden. Neben Zeitgeberereignissen kann der Aufruf des Ticket Processor allerdings auch durch andere Ereignisquellen wie beispielsweise Protokollereignisse oder Daten am Kommunikationssystem aktiviert werden. Die Wahl eines

entsprechenden Aktivierungsschemas ist dabei aufgabenspezifisch festlegbar.

Die Zeitgeberverwaltung ist ebenfalls Aufgabe des Ticket Servers. Dazu muss bei der Implementierung dieses Grundmoduls ein Systemzeitgeber eingebunden werden, dessen Informationen dann vom Ticket Server selbst intern zur Generierung von Zeitstempeln und für die Aktivierung von zeitgesteuerten Tickets zur Verfügung gestellt werden. Bestandteil der Zeitgeberverwaltung ist auch die Zeitsynchronisierung mit anderen Teilen eines weiter gefassten verteilten Datenerfassungssystems.

Der Ticket Server verwaltet auch die externe Kommunikation über das Kommunikationsinterface. Dazu wird im Ticket Server eine entsprechende Schnittstelle für die Anbindung eines Kommunikationsmoduls implementiert. Die externe Kommunikation bindet das System mit dem implementierten Ticket Server in eine weitere Datenerfassungsumgebung ein oder kann auch verschiedene Systeme mit Ticket Server kaskadieren, indem die externe Kommunikation in einem anderen Ticket Server als Protocol Plugin registriert wird.

Ticket Processor

Die zentrale aktive Komponente des Systems ist der Ticket Processor. Diese als Funktionsbibliothek ausgeführte Komponente ist für die Abwicklung der in den Tickets formulierten Aufgaben zuständig. Dabei greift er auf die Listen der Tickets und Protokolle im Ticket Server zu. Gesteuert und regelmäßig aktiviert wird der Ticket Processor vom Ticket Server. Aus der Datensicht hat der Ticket Processor zwei Seiten, auf der Protokollseite stehen die verschiedenen angebotenen Sensoren, auf der Ticketseite sind die auszuführenden Aufgaben formuliert.

Auf der Protokollseite ist der Ticket Server für die Verwaltung der verwendeten Protokolle und die darüber angeschlossenen Sensoren verantwortlich. Zum Start des Ticket Servers und damit auch dem ersten Aufruf des Ticket Processors ist die Liste der angeschlossenen Protokolle und Sensoren leer. Soll nun ein neues Protokoll aktiviert werden, ruft ein entsprechendes Konfigurationsticket eine Interfacefunktion des Ticket Processors auf, die ein neues Protokoll PlugIn aktiviert. Dazu wird zunächst überprüft, ob das angeforderte Protokoll überhaupt verfügbar ist. Ist dies der Fall, wird ein neuer Protocol Control Block erstellt und die Aktivierungsfunktion des Protokoll PlugIns wird aufgerufen, die dann die entsprechenden Konfigurationsarbeiten zur Verwendung vornehmen kann. Sind diese Schritte erfolgreich abgeschlossen, steht das Protokoll zur Verwendung bereit und der aktuelle Protocol Control Block wird in eine Liste im Ticket Server abgelegt. Die Deaktivierung eines Protokolls kann entsprechend über eine Interfacefunktion aus einem Ticket heraus ausgelöst werden. Dazu wird allerdings geprüft, ob auf diesem Protokoll noch Sensoren registriert sind, die in diesem Fall noch deaktiviert werden müssen. Diese Vorgehensweise erlaubt eine Umkonfiguration sogar zur Laufzeit des Systems, wenn von außerhalb entsprechende Konfigurationstickets im System erstellt werden.

Für die Verwendung eines Sensors muss zunächst ein Protokoll wie beschrieben registriert werden. Dies ist zwar bei einfachen Sensoren, welche in eingebetteten Systemen auch direkt auf einem Mikrocontroller angesprochen werden können, ein etwas aufwändigerer Zwischenschritt, der allerdings bei der Verwendung von Sensoren an einem Sensorbus einen wesentlichen Vorteil hat. Zugunsten einer homogenen Lösung wurde daher eine zweistufige Lösung für die Anbindung von Sensoren definiert. Bei der Registrierung eines Sensors am Ticket Processor laufen nun ähnliche Vorgänge ab, wie bei der Registrierung eines Protokolls. Ein Konfigurationsticket fordert mit einem eindeutigen Bezeichner eines re-

gistrierten Protokolls und einer Sensoridentifikationsnummer die Aktivierung des Sensors an. Der Ticket Processor überprüft, ob das entsprechende Protokoll vorhanden und erfolgreich aktiviert ist, im Anschluss wird dann die Funktionalität für die Sensorregistrierung des Protokoll PlugIns aufgerufen. Die eigentliche Aktivierung des Sensors und der Aufbau einer Kommunikationsverbindung zu diesem Sensor wird dann durch das Protokoll PlugIn vorgenommen, der Ticket Processor ist davon nicht berührt. Bei einer erfolgreichen Registrierung des Sensors erstellt der Ticket Processor einen Eintrag in seiner Sensorverwaltungsliste und meldet dem aufrufenden Ticket den Erfolg zurück. Für die Deaktivierung eines Sensors läuft der Vorgang mit den entsprechenden Prüfungen ebenfalls durch die Verwendung von Schnittstellenfunktionen des Protokoll PlugIns ab. Zum Ende des Vorgangs wird der Sensor aus der Verwaltungsliste gelöscht und steht für weitere Messaufgaben nicht mehr zur Verfügung. Durch die geschilderte Vorgehensweise sind auch Sensoren zur Laufzeit dynamisch hinzufügbare und entfernbare. Allerdings ist es nicht zweckmäßig, dies während laufender Datenerfassungsaufgaben durchzuführen, da die Registrierungs- und Aktivierungsvorgänge vor allem bei Sensorbussystemen möglicherweise die Echtzeitbedingungen durch eine längere Bearbeitungsdauer verletzen können, dieses Verhalten ließe sich nur mit einem Echtzeitbetriebssystem verbessern.

Durch die geschilderten Protokoll- und Sensoraktivierungsschemata wird auch eine weitere interessante Eigenschaft des Systems realisiert: es können weitere verteilte Sensorsysteme an ein Messsystem gekoppelt werden, wenn sie gerade verfügbar sind, bei verloren gegangener Verfügbarkeit, sind sie wieder deaktivierbar. Für den Einsatz im beschriebenen Messsystem für die Haptikanalyse ist dies zwar nicht notwendig, diese Eigenschaft kann aber in verteilten mobilen Sensorsystemen mit Funkverbindungen sehr gut eingesetzt werden.

Auf der Ticketseite führt der Ticket Processor ebenfalls alle Verwaltungsaufgaben für die Tickets durch. Die Instanziierung eines neuen Tickets kann entweder aus dem Ticket Server oder aus einer aktiven Ticket Service Function vorgenommen werden. Die Funktionalität des Tickets wird durch die, beim Aufruf angegebene, zugehörige Ticket Service Function bestimmt. Ebenfalls können bei der Instanziierung noch zusätzliche Daten übergeben werden. Der Ticket Processor überprüft daraufhin die Existenz einer entsprechenden Ticket Service Function und erstellt in diesem Fall ein entsprechendes Ticket. Die Ticket Service Function wird dann mit dem neu erstellten Ticket aufgerufen. Nach dem abgeschlossenen ersten Aufruf wird das Ticket in die Ticketliste des Ticket Servers eingetragen und verbleibt dort bis zum nächsten Aufruf. Das Ende der Lebenszeit eines Tickets ist erreicht, sobald sein Status die Beendigung der realisierten Aufgabe anzeigt. Das Ticket wird dann ohne weitere Prüfungen aus der Ticketliste entfernt. Für den speziellen Fall, dass ein Ticket nur ein einziges Mal bei seinem Start ausgeführt wird, wird es sofort nach diesem ersten Aufruf gelöscht, ohne einen Umweg über die Ticketliste zu nehmen.

Die Tickets unterscheiden sich nun in einem Punkt von den Protokoll PlugIns und von den Sensoren: prinzipiell können beliebig viele Tickets zu einer Ticket Service Function existieren. Dies ist auch insofern sinnvoll, wenn mehrere gleichartige Sensoren am System angeschlossen und registriert sind. Sie unterscheiden sich dann nur durch ihre Identifikationsnummer, sind aber aus Sicht des Systems sonst völlig gleich. Es wäre nicht zweckmäßig, nun für jeden physikalisch vorhandenen Sensor eine eigene Ticket Service Function zu erstellen. Dies würde bei einer Modifikation des Sensorsystems nämlich bedeuten, dass auch die Software angepasst werden müsste. Mit der dargestellten Vorgehensweise muss lediglich die Konfiguration verändert werden, dies kann sogar zur Laufzeit des Systems

geschehen. Hierbei muss allerdings darauf geachtet werden, dass nicht mehrere Tickets versuchen, gleichzeitig auf einen Sensor zuzugreifen, der Ticket Processor kann dies nicht grundsätzlich ausschließen. Die Erzeugung von mehreren Tickets für einen Sensor mit unterschiedlichem Aktivierungszeitpunkt dagegen ist durchaus sinnvoll für die Erfassung von mehreren Messpunkten von einem Sensor.

Neben den diskutierten Verwaltungsaufgaben stellt der Ticket Processor auch Kontakt zur Zeitgeberverwaltung des Ticket Servers her, um Datenpaketen vom Sensor und den Aufrufen der Ticket Service Functions Zeitstempel zu übermitteln. So können die erfassten Daten jederzeit mit dem Systemzeitgeber synchronisiert und als Echtzeitdaten gespeichert werden.

Ticket

Durch die Tickets werden Konfigurations- und Messaufgaben instanziiert. Dabei sind die Tickets allerdings keine ausführbaren Einheiten und enthalten keinen Code, sie beschreiben lediglich den aktuellen Status eines Zustandsmodells, dessen Funktionalität in der zugehörigen Ticket Service Function beschrieben ist. Daher werden die Tickets selbst als Datenstruktur implementiert, die bei der späteren Verwendung durch den Ticket Processor im Speicher des Ticket Servers verwaltet wird.

Ein Ticket enthält stets die folgenden Informationen: eine eindeutige Identifikationsnummer, welche auch bei mehreren Tickets für eine Ticket Service Function unterschiedlich ist. Eine Referenz auf die zugehörige Ticket Service Function erlaubt es dem Ticket Processor das Ticket zu aktivieren und so die hinterlegte Aufgabe Schritt für Schritt durchzuführen. Der im Ticket enthaltene Statuscode ist für zwei verschiedene Dinge wichtig: zum Einen zeigt eine Menge vordefinierter Statuscodes dem Ticket Processor spezielle Zustände an, zum Beispiel dass das Ticket abgeschlossen ist und gelöscht werden kann. Andere mögliche Zustände können von der Ticket Service Function verwendet werden, um zeitliche durch mehrere verschiedene Schritte eine komplexere Aufgabe zu lösen. Das Datenfeld für die Aktivierung spielt eine besondere Rolle bei einer zeitlich gesteuerten Aktivierung und beim Warten auf Daten. Dabei legt die Ticket Service Function im Aktivierungsfeld einen Systemzeitpunkt bzw. die Identifikation eines Sensors ab, auf den mit der Aktivierung gewartet wird. Entdeckt der Ticket Processor, dass die jeweilige Bedingung erfüllt ist, kann dann das Ticket ohne eine weitere Zustandsabfrage direkt aktiviert werden. Schließlich enthält jedes Ticket noch ein Datenfeld, in dem weitere aufgabenspezifische Daten abgelegt werden können und für zukünftige Schritte erhalten bleiben.

Der Lebenszyklus eines Tickets beginnt mit der Instanzierung nach dem Aufruf einer Schnittstellenfunktion des Ticket Processors und setzt sich dann über ein- oder mehrmaliger Aktivierung der zugehörigen Ticket Service Function fort. Dabei wird das Ticket jeweils mit den eventuell veränderten Daten und dem Status Code im Ticket Server gespeichert. Ist die Aufgabe erfüllt, wird die Ticket Service Function bei der letzten Aktivierung schließlich des Status des Tickets auf abgeschlossen setzen und der Ticket Processor entfernt das Ticket wieder aus der Liste der aktiven Tickets. Rückmeldungen an einen Aufrufer müssen nicht mehr verschickt werden, dies muss bereits von der Ticket Service Function erledigt worden sein.

Ticket Service Function

Die Funktionalität der Messaufgaben wird in der Ticket Service Function implementiert. Dabei verwendet sie die Informationen, die in einem Ticket vorliegen, um einen Folgezustand für das gerade bearbeitete Ticket zu generieren. Die einzelnen Aufrufe der Ticket Service Function sind dabei nicht durch andere Komponenten des Softwaresystems unterbrechbar, daher muss bei der Implementierung darauf geachtet werden, dass durch die Ausführung nicht das gesamte System blockiert wird und damit seine Echtzeitfähigkeit verliert. Vorgänge die mit Wartezyklen behaftet sind werden daher von der Funktion lediglich angestoßen und nach Abschluss des Vorganges die Ergebnisse wieder entgegengenommen.

Grundsätzlich wird durch die Ticket Service Function ein Zustandsautomat realisiert. Die Aktivierung erfolgt durch den Ticket Processor mit den Daten aus einem Ticket. Ausgehend vom aktuellen Zustand und eventuell weiteren Informationen, welche die jeweilige Aufgabe erfordert, kann die Ticket Service Function während der Aktivierungsphase nun verschiedene Aktivitäten ausführen. Die Ausführung endet mit der Ausgabe eines neuen Zustands des Tickets. Da die Funktion das gesamte Ticket erhält, kann sie auch eventuelle Zusatzinformationen modifizieren. Bei der Ausführung stehen dem Ticket die Schnittstellenfunktionen des Ticket Processors und des Ticket Servers zur Verfügung. Darüber können zunächst Protokolle und Sensoren durch den Ticket Processor registriert werden, eine Konfiguration der jeweiligen Komponenten kann ebenfalls durch Ticket Service Functions realisiert werden. Zur Messdatenerfassung können Daten eines Sensors über seine Identifikationsnummer direkt beschafft werden oder eine Messung auf dem Sensor lediglich gestartet werden. Im zweiten Fall wird das Ticket in einen Wartezustand versetzt und die Sensoridentifikationsnummer im Aktivierungsfeld abgelegt. Nach der Reaktivierung durch den Ticket Processor können die Daten dann vom Sensor gelesen werden. In beiden Fällen werden die erfassten Daten durch die vom Ticket Processor übermittelten Zeitstempel zeitlich korrekt angeordnet.

Nach einer eventuellen Vorverarbeitung der Daten direkt in der Ticket Service Function werden die Daten dann über die Schnittstellenfunktionen des Ticket Servers im Speicher abgelegt oder über die Kommunikationsschnittstelle versendet. Es besteht auch die Möglichkeit, Daten wieder aus dem Speicher zu lesen, dies ist für eine Zwischenspeicherung und den späteren Versand der Daten als Block von Nutzen.

Neben der geschilderten Interaktion mit den Protokollen und Sensoren können die Tickets aber auch selbst wieder die Erstellung neuer Tickets veranlassen. Dies ist vor allem bei der Erledigung komplexerer Aufgaben von Nutzen, da die Aufgaben selbst wieder in kleinere wiederverwendbare Teile zerlegt werden können. Es lassen sich dann übergeordnete Verwaltungstickets erstellen, die nicht selbst die Konfiguration oder Datenerfassung implementieren, sondern lediglich andere Tickets generieren, in denen dann die eigentliche Verarbeitung stattfindet. Besonders auf eingebetteten Systemen hat dies den Vorteil, dass Änderungen in der Durchführung einer Datenerfassungsaufgabe nicht zwangsläufig zu Änderungen im Code eines Programmes führen, sondern durch Konfiguration eines übergeordneten Tickets erledigt werden können. Durch die erreichte Modularität steigt auch die Wiederverwendbarkeit der schon implementierten Ticket Service Functions, was zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit führt, wenn neue Aufgabenstellungen mit dem System gelöst werden sollen.

Protokoll PlugIn und Protocol Control Block

Die Protokoll PlugIns stellen zusammen mit dem Protocol Control Block die Verbindung von Sensoren zum Kern des Ticket Servers bereit. Die Abläufe dabei ähneln dem Zusammenspiel von Ticket und Ticket Service Function. Allerdings besitzen die Protokoll PlugIns eine wesentlich fester definierte Schnittstelle mit einer größeren Anzahl von Schnittstellenfunktionen und dafür eine geringere Flexibilität bei der Implementierung von verschiedenen Aufgaben. Jedes instanziierte Protokoll PlugIn besitzt genau einen Protocol Control Block, der zum Einen die Identifikationsnummer des instanziierten Protokolls und Informationen über die Protokollart selbst enthält. Zum Anderen kann das Protokoll PlugIn im zugeordneten Protocol Control Block auch Informationen speichern, die zum Betrieb der verwalteten Schnittstelle nötig sind. Eine Besonderheit der Protokoll PlugIns ist, dass sie auch durch externe Ereignisquellen aktivierbar sind. Diese Quellen können auf einfachen eingebetteten Systemen Hardware-Interrupts sein, wird der Ticket Server auf einem Betriebssystem eingesetzt, kann der Betrieb der Protokolle auch in eigenen parallelen Prozessen ausgelagert sein. Aus Sicht des Ticket Servers bzw. des Ticket Processors, der die Schnittstelle der Protokoll PlugIns betreibt, ist dies allerdings transparent.

Die Instanzierung eines Protokoll PlugIns geschieht durch den Ticket Processor, der eine entsprechende Schnittstellenfunktion des Protokoll PlugIns aufruft. Nach einer erfolgreichen Initialisierung des Protokolls wird ein entsprechender Protocol Control Block im Ticket Server abgelegt, das Protokoll steht nun zur Verfügung. Ebenfalls über eine Schnittstellenfunktion kann das Protokoll kontrolliert beendet werden. Während ein Protokoll aktiv ist, wird es regelmäßig vom Ticket Processor ebenfalls über eine Schnittstellenfunktion aktualisiert. Bei Protokollen, die extern ereignisgesteuert ablaufen, kann diese Aktualisierung entfallen.

Das Protokoll PlugIn ist nun verantwortlich für die Verwaltung von angeschlossenen und registrierten Sensoren und für den Betrieb der jeweiligen Sensorschnittstelle. Bei der Instanzierung eines Sensors durch den Ticket Processor muss das Protokoll den gewünschten Sensor lokalisieren und gegebenenfalls die Kommunikation zum jeweiligen Sensor initialisieren. Im Folgenden ist nun das Protokoll für die Bereitstellung einer Verbindung mit dem Sensor verantwortlich. Über die Schnittstelle zum Ticket Processor können nun Messungen mit Hilfe des Sensors gestartet und Daten vom Sensor gelesen werden. Sind die Daten nicht direkt nach dem Start der Messung verfügbar, ist es die Aufgabe des Protokoll PlugIns den Abschluss der Messwerterfassung zu überwachen und dem Ticket Processor dies zu signalisieren.

Neben dem Ticket Server stellen vor allem die Protokoll PlugIns die Teile des Softwaresystems dar, welche die Schnittstelle zur verwendeten Hardware bilden. Daher müssen sie bei einem Wechsel auf eine andere Plattform gegebenenfalls angepasst werden, allerdings können die Kernkomponenten des PlugIns, wie die Aktualisierungsfunktion und die Schnittstellenfunktionen zum Ticket Server, meist direkt übernommen werden. Bei komplexeren Protokollen oder der Implementierung von Kommunikationsschnittstellen als Protokoll PlugIns spart diese Vorgehensweise wiederum Entwicklungsaufwand ein.

5.4.4 Schnittstellen und Datenstrukturen des Softwaresystems

Zwischen den einzelnen Komponenten des Softwaresystems wurden funktionale Schnittstellen definiert, da das System modular auf verschiedene Hardwareplattformen und Mess-

aufgaben zuschneidbar sein soll. Vor allem gilt dies für die Schnittstellen zwischen dem Ticket Processor und der Ticket Service Function, sowie zwischen Ticket Processor und Protokoll PlugIn. An beiden Stellen sind dynamische Änderungen zur Laufzeit möglich, das heißt, es steht erst zur Laufzeit fest, welche Funktion zu welchem Zeitpunkt aufgerufen wird. Für den Einsatz auf unterschiedlichen Hardwareplattformen ist die Schnittstelle zwischen Ticket Server und Ticket Processor von besonderer Bedeutung, da der Ticket Server den Zugriff auf Speicher und Zeitgeber verwaltet. Neben dieser Funktion repräsentiert der Ticket Server auch gegenüber dem Programm, welches ihn startet, die Steueroberfläche für das gesamte System.

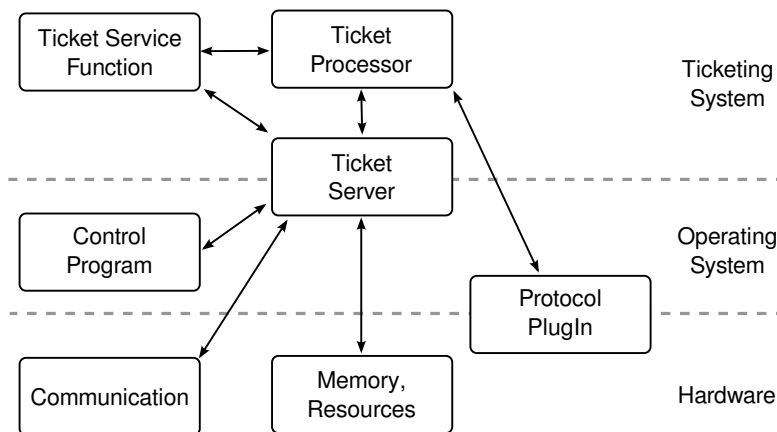


Abbildung 5.8: Daten- und Steuerfluss im Ticket Server System

Abbildung 5.8 skizziert die Interaktionswege zwischen den einzelnen Teilen des Ticket Server Systems. Auf diesen Wegen interagieren die Teile des Systems miteinander und tauschen über die Funktionsschnittstelle Daten aus. Im Folgenden sind jeweils die Schnittstellen der einzelnen Komponenten kurz vorgestellt. Die Aufstellung ist dabei als Liste aufrufbarer Funktionen zu verstehen. Über die programmiertechnische Realisierung werden an dieser Stelle noch keine Annahmen gemacht. Allerdings ist eine Implementierung in einer vollständig kompilierbare Sprache sinnvoll, da Laufzeitumgebungen in eingebetteten Systemen einen erheblichen Zusatzaufwand mit sich bringen, sofern sie überhaupt existieren. Des Weiteren kann das Echtzeitverhalten einer systemnahen Hochsprache meist besser kontrolliert werden, als beispielsweise bei interpretierten Sprachen.

Die tabellarische Beschreibung der Schnittstellen der einzelnen Module in ihren Funktionen und Daten sind in A aufgeführt.

5.4.5 Zentrale Verarbeitungsschleife im Ticket Processor

Mit den vorgestellten Systemkomponenten und deren Schnittstellen können nun die verschiedenen Funktionalitäten in einem Messsystem allgemein und speziell im Messsystem für die Haptikanalyse implementiert werden. Die Definition der Module und ihrer Schnittstellen macht nun allerdings noch keine Festlegung, wie die Abläufe im System aussehen, sie definieren lediglich deren Funktionalitäten. Daher wird nun noch einmal konkret auf den Ablauf des Kontrollflusses im Ticket Processor eingegangen. Ist dieser einmal implementiert, kann er auch unabhängig von veränderten Tickets oder verschiedenen Protokollen verwendet werden.

Sobald der Ticket Processor und die systemspezifischen Komponenten wie Ticket Server und Protokoll PlugIns erstellt sind, können die einzelnen Aufgaben auf dem System in Tickets formuliert und durch die Implementierung der jeweiligen Ticket Service Function gelöst werden. Die Formulierung von Systemfunktionalitäten als Tickets wird in Abschnitt 5.4.6 weiter ausgeführt.

Ticket Processor

Der Ticket Processor stellt eine Vielzahl von Schnittstellen zwischen den verschiedenen Modulen des Softwaresystems zur Verfügung, die wichtigste eigene Funktion ist allerdings die zyklisch aufgerufene Funktion `cycleTicketProcessor`. Diese wird wie beschrieben vom Ticket Server regelmäßig aufgerufen und stößt dann die Verarbeitung von Ereignissen und Daten im gesamten System an.

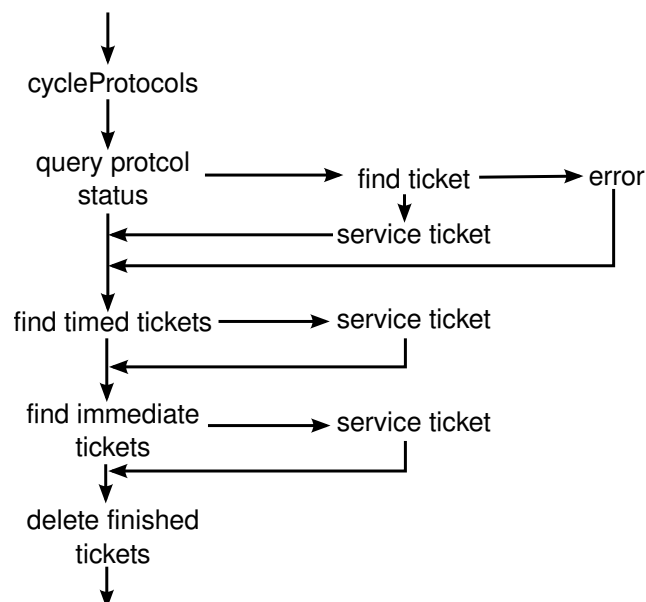


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung des Kontrollflusses im Ticket Processor

Der Durchlauf der Aktualisierungsfunktion des Ticket Processors beginnt mit dem Aufruf von `cycleTicketProcessor` durch den Ticket Server. Der Übersichtlichkeit halber ist in Abbildung 5.9 immer nur ein Aufruf der verschiedenen Aktualisierungsfunktionen dargestellt. Im Allgemeinen muss natürlich jedes einzelne Protocol PlugIn und jedes Ticket untersucht werden.

Zum Beginn aktualisiert der Ticket Processor durch den Aufruf der Schnittstellenfunktion `cycleProtocol` die Verarbeitung aller Protokollzustände. Die einzelnen Protokoll PlugIns können die Aktivitäten der von ihnen betreuten Bussysteme und Sensoren in dieser Phase aktualisieren und die Übertragung von neuen Messdaten durchführen. Ist die Phase der Protokollaktivität abgeschlossen, wird der Status des jeweiligen Protokolls aktualisiert und die Kontrolle zurück an den Ticket Processor übertragen. Bei ereignisaktivierten Protokollen kann diese Funktion entfallen, in diesem Fall wird nur das Statusfeld des Protocol Control Blocks modifiziert, wenn in der Zwischenzeit Aktivität auf dem Protokollsystem stattfand.

Im Anschluss wird der Status aller Protokolle darauf untersucht, ob Ereignisse durch Tickets bearbeitet werden müssen. Ein typisches Ereignis wäre zum Beispiel, dass neue Sensordaten von einem Sensor vorliegen, die in einem vorangegangenen Durchlauf durch Starten eines Messvorgangs erzeugt wurden. Für den Fall, dass bei einem Protokoll ein solches Ereignis vorliegt, durchsucht der Ticket Server die Liste der Tickets nach solchen, die auf neue Daten warten und vergleicht die Sensoridentifikationsnummer der neuen Daten mit der Nummer, auf die das Ticket wartet. Das gefundene Ticket wird durch einen Aufruf der Ticket Service Function aktiviert und erhält zusammen mit den Ticketdaten einen aktuellen Zeitstempel. Die Verarbeitung des Ereignisses wird somit an die Ticket Service Function delegiert. Sollte für ein Ereignis kein Ticket gefunden werden, das die Verarbeitung übernimmt, wird das Ereignis in einem Fehlerspeicher des Ticket Servers protokolliert. So können auch unerwartete Ereignisse dokumentiert werden. Durch eine Überwachung des Fehlerspeichers durch andere Tickets oder ein externes Programm können auch Diagnosefunktionalitäten für das System realisiert werden.

Im nächsten Schritt werden vom Ticket Processor alle Tickets zur Ausführung gebracht, die auf eine Aktivierung zu einem bestimmten Systemzeitpunkt warten. Dazu wird der Status des jeweiligen Tickets untersucht und das zugehörige Aktivierungsfeld mit der Systemzeit verglichen. Für den Fall, dass eine Aktivierung durchgeführt werden muss, wird ein aktueller Zeitstempel generiert und der Ticket Service Function mit den Ticket-Daten übergeben. Zum Ende eines Durchlaufs werden noch alle Tickets verarbeitet, die zur Ausführung bereit sind, aber keine spezielle Aktivierungsmethode im Status spezifizieren.

Das System besitzt, wie bei der Beschreibung der Komponenten geschildert, kein Prioritätensystem für die verschiedenen Aufgaben. Allerdings wird durch die vorgestellte Reihenfolge der Verarbeitung implizit ein gewisses Prioritätenschema realisiert. Zunächst werden alle Protokolloperationen und damit neue empfangene Daten verarbeitet, zeitgesteuerte Aufgaben kommen an zweiter Stelle und an dritter Stelle folgen Aufgaben ohne spezielle Aktivierungsvorgaben. Aus Sicht der zeitlichen Verwaltung von Daten ist dies die natürliche Reihenfolge, denn so können vor der Generierung neuer Messdaten zunächst schon erfasste Daten aus den Sensoren und Protokollen entfernt werden und diese so für die Erzeugung neuer Messdaten frei gemacht werden. Allerdings lässt sich das System auch noch durch Überwachungsfunktionen erweitern: zunächst kann im Ticket Processor die Einhaltung der Zeitschranken für einen Zyklusdurchlauf geprüft werden und der aktuelle Zyklus im Notfall abgebrochen werden. Dies führt dazu, dass einige Tickets, die keine Echtzeitforderungen machen, nicht bearbeitet werden. Steht noch weniger Zeit zur Verfügung, werden möglicherweise Zeitschranken von Echtzeit-Tickets verletzt. Der Verlust von aufgezeichneten Daten durch Überschreiben oder Probleme durch nicht ausgelöste Protokollaktionen werden unwahrscheinlicher, da diese zu Beginn eines Zyklus durchgeführt werden. Auch die Einführung eines Prioritätensystems kann als Erweiterung implementiert werden, die Prioritäten würden dann darüber entscheiden, an welcher Stelle ein Ticket in die Verarbeitungsliste eingefügt wird. Gegebenenfalls ist auch die Priorisierung von verschiedenen Protokollen möglich. Diese Erweiterungen sind allerdings im aktuellen System nicht realisiert.

Die weiteren Schnittstellenfunktionen des Ticket Processors leiten die verschiedenen System- und Protokollfunktionen auf die Ticket-Seite des Moduls weiter und verwalten dabei die stattfindenden Aufrufe. Dabei ergibt sich die zu Grunde liegende Funktionalität aus der Beschreibung in 5.4.3, weswegen sie hier nicht näher ausgeführt wird.

5.4.6 Formulierung typischer Systemaufgaben als Ticket

Mit der, im vorangegangenen Abschnitt diskutierten, zentralen Verarbeitungsschleife ist das System nun in der Lage, Aufgaben entgegenzunehmen und der Bearbeitung zuzuführen. Die Systemaufgaben werden nun als Ticket formuliert, das heißt, es muss eine Ticket Service Function formuliert und gegebenenfalls auch passende Datenfelder für das Ticket definiert werden. Auf drei typische, immer wiederkehrende Aufgaben und deren Formulierung als Ticket wird daher im Folgenden genauer eingegangen: die *Konfiguration*, die *Einzelmessung* und *Mehrfachmessungen* werden im Messsystem für die Haptikanalyse benötigt und stellen grundlegende Funktionalitäten bereit. Aus diesem Grund wurden sie hier zur Demonstration ausgewählt.

Konfiguration

Konfigurationsaufgaben sind stets Bestandteil des Systemstarts und kommen auch bei der Aktivierung von Protokollen bzw. Sensoren zur Laufzeit zum Einsatz. Die typische Konfigurationsaufgabe stellt sich folgendermaßen dar: Es soll ein bestimmter Sensor an einem Protokoll aktiviert und konfiguriert werden, im Anschluss sollen Messungen mit diesem Sensor durchgeführt werden. Diese Aufgabenstellung wird nun unter der Verwendung der Schnittstellen des Ticket Processors als Ticket Service Function formuliert. Der prinzipielle Ablauf ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

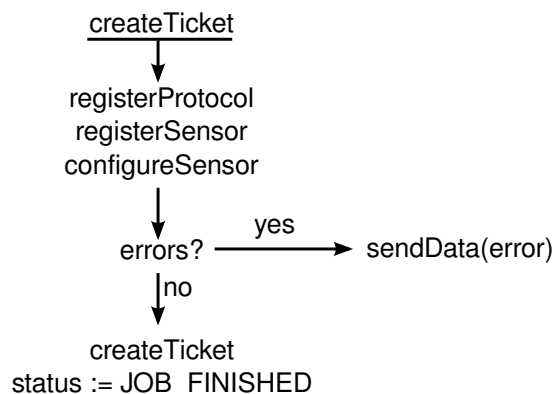


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung des Ablaufs in einem Konfigurations-Ticket

Der Ablauf beginnt, wie bei jedem Ticket, mit der Instanzierung durch die Schnittstellenfunktion `createTicket` des Ticket Processors. Bei dieser Instanzierung ruft der Ticket Processor die Ticket Service Function mit einem neu erstellten Ticket auf, worauf die Ticket Service Function die Initialisierung des Tickets für den jeweiligen Einsatzzweck leisten muss. Im Fall des vorliegenden Konfigurationstickets finden alle Vorgänge in dieser Phase statt, das Ticket hat also nur einen einzigen aktiven Zustand. Bei dem skizzierten Ticket wird das zum Sensor gehörende Protokoll registriert und im Anschluss der Sensor beim Ticket Processor angemeldet und konfiguriert. Zum Einsatz kommen hier die Schnittstellenfunktionen des Ticket Processors. Sind in diesem Schritt Fehler aufgetreten, wird eine Fehlermeldung generiert und im Datenfeld des Tickets abgelegt. Der Status des Tickets wird auf den Fehlerzustand gesetzt und die Ausführung beendet.

Für den Fall, dass keine Fehler aufgetreten sind, geht die Ticket Service Function davon

aus, dass nun der Sensor angemeldet und registriert ist. An dieser Stelle führt das Ticket allerdings anschließende Messungen nicht selbst aus, sondern es erzeugt ein neues Ticket für Messungen auf dem Sensor. Diese Vorgehensweise erlaubt es, schon bestehende Tickets bzw. deren Ticket Service Function in anderen Aufgaben weiter zu nutzen. Ist das Ticket erfolgreich erstellt, beendet die Ticket Service Function die Ausführung und setzt vor dem Abschluss noch das Statusfeld auf einen vordefinierten Endstatus. Dies signalisiert dem Ticket Processor, dass dieses Ticket nicht mehr benötigt wird und gelöscht werden kann. Das exemplarisch vorgestellte Konfigurationsticket präsentiert den Ablauf eines einfachen, sofort wieder beendeten Tickets und die Möglichkeit, weitere Tickets nach Bedarf dynamisch zu erzeugen. Diese Prinzipien finden vielfachen Einsatz beim Starten von Messaufgaben.

Einzelmessung

Das folgende Ticket zeigt beispielhaft die Modellierung einer Messaufgabe, bei der ein einzelner Messwert von einem Sensor erfasst werden soll, wobei für die Bereitstellung des Messwerts eine gewisse Zeit benötigt wird. Dieses Verhalten kann bei Sensoren auftreten, die noch gewisse Vorverarbeitungsschritte selbst auf den erfassten Daten ausführen oder Sensoren die gleich eine ganze Reihe von Messpunkten aufnehmen und die Daten dann gesammelt übertragen. In diesem Fall lässt sich der Vorteil der asynchronen Verarbeitung von Beginn der Messung bis zum Einlesen der Daten besonders gut zeigen, da das System nicht durch Warten auf des Sensor blockiert wird, die Sensordaten aber sehr schnell nach ihrer Verfügbarkeit eingelesen und gespeichert werden.

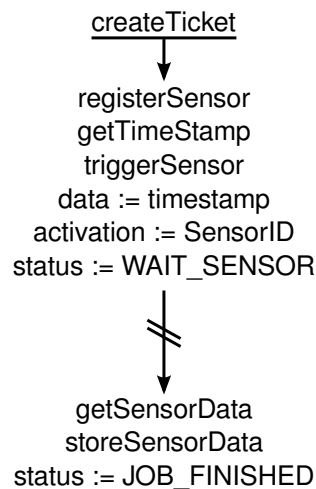


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung des Ablaufs in einem Ticket für eine Einzelmessung

Der Ablauf bei der Verarbeitung (5.11) stellt sich folgendermaßen dar: bei der Instanziierung des Tickets durch den Ticket Processor wird der verwendete Sensor registriert und sofort im Anschluss der Messvorgang im Sensor über die Schnittstellenfunktion `triggerSensor` gestartet. Die Ticket Service Function bereitet nun den Wiederaufruf durch den Ticket Processor zu einem späteren Zeitpunkt vor, da bekannt ist, dass der Sensor die Daten erst zu einem späteren Zeitpunkt liefern wird. Dazu wird zunächst der Zeitstempel, der vor der

Triggerung des Sensors vom Ticket Processor angefordert wurde in die Nutzerdaten des Tickets geschrieben. Von dort kann er zum späteren Zeitpunkt gelesen und den Messdaten zugeordnet werden. Des Weiteren wird noch das Aktualisierungsfeld im Ticket mit der Sensoridentifikationsnummer beschrieben und der Status des Tickets auf einen vordefinierten Wert gesetzt, der dem Ticket Processor das Warten auf die Daten von eben diesem Sensor signalisiert. An dieser Stelle wird die Ticket Service Function beendet und die Kontrolle zurück an den Ticket Processor übertragen.

Der Ticket Processor legt das aktualisierte Ticket nun in die interne Liste im Ticket Server ab und bearbeitet, wie in beim Ablauf des Ticket Processor beschrieben, weitere anliegende Aufgaben. Im Hintergrund nimmt der Sensor Daten auf und wird währenddessen lediglich von der Aktualisierungsfunktion des betreuenden Protokolls regelmäßig abgefragt. Bei Sensoren, die selbst eine Signalisierung bei abgeschlossenem Erfassungsvorgang auslösen, kann auch diese Abfrage entfallen, das System kann sich während dieser Zeit mit anderen Aufgaben befassen. Sobald die Daten verfügbar sind, wird das Protokoll PlugIn beim nächsten Aufruf diese in das System übertragen und der Ticket Processor stellt bei der Abfrage des Protokoll-Status fest, dass von einem Sensor neue Daten vorliegen.

In der Liste der Tickets kann nun an Hand des Status und der Sensoridentifikationsnummer das wartende Ticket gefunden werden. Zur Reaktivierung wird die Ticket Service Function mit den aktuellen Ticketdaten und einem Zeitstempel aufgerufen. In der Ticket Service Function selbst kann an Hand des Status geschlossen werden, dass nun Daten auf dem Sensor verfügbar sein müssen, diese Daten werden nun mit Hilfe der Schnittstellenfunktion `getSensorData` über das entsprechende Protokoll PlugIn gelesen und im Anschluss durch einen Aufruf von `storeMeasurementData` im Messwertspeicher des Ticket Servers abgelegt. Das Ticket meldet nun über den Ticket Processor noch den Sensor vom Protokoll ab und schreibt den Wert für die Beendigung der Aufgabe in das Statusfeld des Tickets. Nach der Beendigung der Ticket Service Function löscht der Ticket Processor automatisch das Ticket und die Aufgabe ist abgeschlossen.

Im Ticket für Einzelmessungen wird die Fähigkeit des Ticket Processors verdeutlicht, längere autonom ablaufende Vorgänge im Hintergrund zu halten und eine Aufgabe ereignisgesteuert wieder zu aktivieren. Auch die Verwaltung eines Zeitstempels zum Start einer Messung und die spätere Zuordnung zu den erhaltenen Daten ist in diesem Ticket implementiert. Das beschriebene Ticket kommt entweder selbst oder als Bestandteil komplexerer Tickets zum Einsatz, gegebenenfalls kann es auch von einem zeitlich aktivierten übergeordneten Ticket dynamisch erstellt werden und dann seine Aufgabe ausführen. So kann eine Neuimplementierung bei Mehrfachmessungen von diesem Sensortyp vermieden werden.

Mehrfachmessungen

Eine häufig auftretende Messaufgabe stellen Mehrfachmessungen dar, hier sollen von einem, am System angeschlossenen, Sensor eine ganze Reihe Messwerte erfasst werden. Die einzelnen Messpunkte werden dabei in einem bestimmten zeitlichen Abstand generiert. Das hier beispielhaft vorgestellte Ticket für Mehrfachmessungen realisiert diese Aufgabe für einen einfachen Sensor, von dem Daten sofort nach dem Aufruf ausgelesen werden können. Diese Eigenschaft haben vor allem sehr einfache Sensoren wie digitale Eingänge, spezielle Wartezeiten sind hier nicht notwendig oder auch Sensoren die laufend einen Messwert erfassen und direkt im Anschluss an die Zwischenspeicherung des erfassten Wertes

den nächsten Erfassungsvorgang starten. Bei der Vorstellung der Ticket Service Function für Mehrfachmessungen wurde dieser Sensor gewählt, da so die Darstellung einfach gehalten werden kann. Die Verwendung eines Sensors wie beim vorher beschriebenen Ticket für die Einzelmessung ist genauso möglich, hier kommt nur ein weiterer Zustand in der Ticket Service Function hinzu. Der Ablauf der Ticket Service Function für Mehrfachmessungen ist in Abbildung 5.12 skizziert.

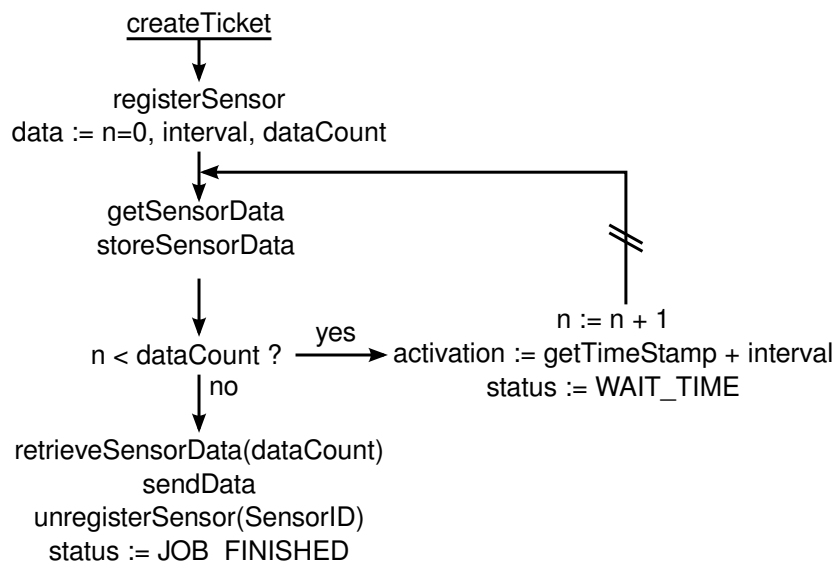


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung des Ablaufs in einem Ticket für Mehrfachmessungen

Die vorgestellte Ticket Service Function führt bei der Instanziierung durch `createTicket` lediglich die Registrierung des Sensors durch und geht dann in einen nur intern definierten Zwischenzustand über. Vor dem Verlassen der Ticket Service Function zu diesem Zeitpunkt wird allerdings noch die Anzahl der aufzunehmenden Messpunkte einmal als Zähler und einmal als Konstante im Speicher für zusätzliche Ticketdaten abgelegt und auch das Messintervall wird so für die weiteren Aufrufe gesichert. Das initialisierte Ticket wird dann vom Ticket Processor im Ticket-Speicher archiviert. Da der Ticket Processor aber alle Tickets in seiner Liste auf eine nötige Aktivierung untersucht und das Ticket am Ende der Liste eingefügt wird, kommt es noch im selben Zyklus des Ticket Processors wieder zur Ausführung. Diese Art der Lösung wurde gewählt, um Doppelungen im Code des Tickets zu vermeiden und den Ablauf möglichst einfach darstellen zu können. Durch den zweifachen Aufruf wird auch im Vergleich zu anderen Verarbeitungsschritten nicht viel Rechenzeit verbraucht, des Weiteren geschieht der doppelte Aufruf des Tickets nur einmalig während der gesamten Lebenszeit des Tickets.

Im zweiten Zustand der Ticket Service Function wird nun mit der Schnittstellenfunktion `getSensorData` direkt der Messvorgang gestartet und die Daten vom Sensor ausgelesen, dies muss allerdings vom Sensor unterstützt werden und zum Implementierungszeitpunkt der Ticket Service Function bekannt sein. Die erfassten Daten werden zusammen mit dem Zeitstempel, den die Ticket Service Function beim Aufruf durch den Ticket Processor erhalten hatte, im Speicher des Ticket Servers abgelegt. Aus dem Datenfeld des Tickets wird der Messwertzähler extrahiert und dekrementiert. Sind noch weitere Werte zu erfassen, wird

aus dem aktuellen Zeitstempel und dem vorgegebenen Zeitintervall ein neuer Aktivierungszeitpunkt berechnet und im Aktivierungsfeld des Tickets hinterlegt. Schließlich wird noch der Status des Tickets auf einen vordefinierten Wert gesetzt, der dem Ticket Processor mitteilt, dass das Ticket auf einen Zeitpunkt der Aktivierung wartet. Mit dem Verlassen der Ticket Service Function wird die Verarbeitung unterbrochen und die Kontrolle wieder an den Ticket Processor übertragen.

Bei jedem der zyklischen Aufrufe des Ticket Processors wird nun das Aktivierungsfeld mit der Systemzeit verglichen, dies führt beim Erreichen des neuen Aktivierungszeitpunkts zum erneuten Aufruf der Ticket Service Function mit dem Ticket als Parameter. Diese erkennt nun am verlassenen Wartezustand, dass eine erneute Messung stattfinden muss und führt diese wie schon beschrieben durch. Der Vorgang wiederholt sich so lange, bis der Messwertzähler auf Null dekrementiert wurde. Ist dieser Zustand erreicht, lädt die Ticket Service Function durch eine Aufruf von `retrieveMeasurementData` die vorher abgelegten Messwerte aus dem Speicher des Ticket Servers und versendet diese mit Hilfe der Schnittstellenfunktion `sendData`. Zum Abschluss der Aufgabe wird nun noch der Status des Tickets auf den vordefinierten Wert für ein abgeschlossenes Ticket gesetzt und die Ticket Service Function verlassen. Damit löscht der Ticket Processor das Ticket und der Vorgang ist beendet.

Das Ticket für die Mehrfachmessung demonstriert die zeitgesteuerte Aktivierung und die Verwendung eines einfachen, synchron erfassten Sensors für die Datenerfassung. Auch die Speicherung von Daten und deren späterer Versand wird in diesem Ticket gezeigt. Dieses Ticket ist typisch für die Aufzeichnung von Datenreihen an einem Sensor mit einer bestimmten Datenrate. Es kann sowohl bei Messsystemen für kürzere dynamische Vorgänge vorkommen, als auch seinen Einsatz bei Datenloggern über einen langen Zeitraum finden. Wie auch beim Ticket für die Einzelmessungen kommt es oft in Kombination mit anderen Tickets vor, allerdings eher als übergeordnete Instanz, die andere Aufgaben dynamisch startet.

5.5 Implementierung der Funktionalitäten für das Messsystem

Das in 5.4.2 vorgestellte Softwaresystem soll nun für die Lösung der Messaufgaben auf den Systemen für den menschlichen und technischen Test eingesetzt werden. Foglich wurden zunächst die Grundmodule für das eingebettete System entworfen und implementiert, um im Anschluss Protokoll PlugIns für die verschiedenen Schnittstellen erstellen zu können. Über die Protokolle werden dann die verwendeten Sensoren angebunden. Die eigentlichen Messaufgaben wurden über geeignete Tickets realisiert. Auch für die Kommunikation zwischen dem PC-basierten Bildverarbeitungssystem und dem eingebetteten System wurden zwei verschiedene Kommunikationsmodule entworfen und implementiert.

5.5.1 Aufgaben der Software im Messsystem

Im Folgenden werden kurz die zu lösenden Aufgaben im Messsystem zusammengestellt, um die anschließende Lösung direkt im Zusammenhang mit der Gesamtaufgabe darstellen zu können. Dabei werden die Aufgaben bereits in die verschiedenen Bereiche des zu implementierenden Softwaresystems gegliedert. Die grundlegende Messaufgabe lautet: es müssen synchronisierte Messwerte von den verschiedenen Sensoren im Messsystem auf

dem verteilten System erfasst werden und die Messwerte müssen im Anschluss zusammengetragen und der Auswertung zur Verfügung gestellt werden.

Für das Grundsystem bedeutet dies, dass jeweils für das eingebettete System und die PC-Umgebung eine Implementierung des Ticket Servers vorliegen muss. Die Notwendigkeit für einen implementierten Ticket Processor mit allen Schnittstellenfunktionen ergibt sich von selbst, ohne diese ist das Softwaresystem nicht in der Lage, Aufgaben zu lösen. Die Implementierung des Ticket Servers muss auf dem eingebetteten System ohne Betriebssystem auskommen und wird nur durch ein aufrufendes Programm gesteuert, auf dem Messrechner (PC) läuft der Ticket Server als eigenens Programm auf dem vorhandenen Betriebssystem. Beide Implementierungen müssen auf dem jeweiligen System einen Messwertspeicher bereitstellen und Zeitstempel generieren können. Für die Kommunikation zwischen den Systemen müssen geeignete Kommunikationsmodule erstellt werden, die eine Zusammenarbeit ermöglichen. Aufbauend auf der Kommunikation muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Systemzeiten der beiden Teillösungen in eine Relation zueinander zu setzen, um die Messwerte von beiden Systemen in einen zeitlichen Bezug zueinander setzen zu können.

Die verschiedenen verwendeten Sensoren sind über verschiedene Hardwareschnittstellen an das System angebunden. Die Protokolle dieser Schnittstellen sind unterschiedlich komplex und werden teilweise von vorhandener Hardware (beim eingebetteten System) oder vom Betriebssystem (auf dem Messrechner) unterstützt oder betrieben. Für jede verwendete Schnittstelle ist ein Protokoll PlugIn zu erstellen und die verwendeten Sensoren, bzw. die Hardware, welche die Daten vom Sensor beschafft in die jeweiligen Protokoll PlugIns zu integrieren.

Die Realisierung der Messaufgabe ist durch Tickets zu implementieren, wobei das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Sensoren zu beachten ist. Ebenfalls über Tickets ist die Konfiguration zu implementieren, die auch nicht im Programm festgeschrieben sein soll, sondern von einem Steuerprogramm zum Systemstart veränderlich sein soll. Dies ist vor allem für das eingebettete System sehr wichtig, da hier alle Einstellungen über das Kommunikationsmodul vorgenommen werden müssen, eine lokale Dateiverwaltung oder Eingabeebene für Konfigurationen besteht nicht und ist auch nicht zweckmäßig zu realisieren.

Für die Verwendung der Software auch im Rahmen des technischen Tests ist noch die Kommunikation mit der Antriebssteuerung notwendig, dies wird allerdings vom verwendeten Regler insofern unterstützt, als dieser die Ablage von Trajektorien in einem internen Speicher unterstützt und auch eine Datenerfassung mit einer bestimmten Datenrate selbstständig durchführen kann.

5.5.2 Erstellung der Grundmodule

Der gesamte Implementierungsprozess für beide Hardwareplattformen wurde parallel durchgeführt, wobei die Verwendbarkeit auf dem eingebetteten System im Vordergrund stand. Der verwendete Mikrocontroller ATmega128 verfügt zwar über eine ausreichende Ausstattung an Rechenleistung und Arbeitsspeicher, allerdings soll diese Leistung möglichst den ausführbaren Aufgaben zugute kommen und nicht in den Verwaltungsfunktionen auf dem System verschwinden. Für die Entwicklung der Grundfunktionen wurde der Cross-Compiler AVR-GCC ausgewählt, als Sprachstandard wurde auf dem eingebetteten System lediglich die Programmiersprache C verwendet. Diese Wahl erlaubt eine

hardwarenahe Programmierung auf der einen Seite und auf der anderen Seite eine gute Weiterverwendbarkeit von hardwareunabhängigem Code für die PC-basierte Messrechnerplattform. Bei der vorliegenden Implementierung wird aus den Grundmodulen und allen Erweiterungsmodulen ein Softwarpaket erstellt, das auf dem Messrechner als eigenständige Anwendung ausgeführt wird. Auf dem eingebetteten System dagegen wird dieses Softwarpaket direkt zusammen mit einer aufrufenden Funktion zu einem Speicherabbild erstellt, das in den Programmspeicher des Controllers übertragen wird und dort als alleinige Anwendung ausgeführt wird. Dynamisches Nachladen von kompilierten Softwaremodulen ist auf dem Mikrocontroller auf Grund der Architektur schwer möglich und zum Zeitpunkt der Programmerstellung mit dem Compiler nicht möglich. Daher wurde aus Gründen der Zweckmäßigkeit die vollständige Erstellung als Einzelanwendung auf beiden Systemen gewählt.

Die Funktionsschnittstelle des Ticket Processors wurde auf dem verwendeten Mikrocontroller implementiert und die Funktionen nach einer Testphase auch auf dem Messrechner entsprechend verwendet. Die Implementierung der Funktionen selbst folgt dabei der Beschreibung in Tabelle A.2 und liegt zusammengefasst als Modul vor. Bei der Implementierung wurde darauf geachtet, quelltextkompatible Programme zu erstellen und so die Einsetzbarkeit auf den beiden verwendeten Systemen zu gewährleisten. Eine eingehendere Beschreibung ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, die einzelnen Funktionalitäten greifen auf Standardtechniken bei der Implementierung zurück.

Da der Ticket Server Teil der Hardwareanpassungsschicht ist, weichen die Implementierungen auf den verschiedenen Systemen in einigen Punkten voneinander ab. Allerdings konnten zentrale Funktionalitäten wie die Verwaltung des Messwertspeichers plattformunabhängig implementiert werden und auch so der Aufwand bei der Erstellung gesenkt werden. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Plattformen besteht bei der zyklischen Aktivierung des Ticket Processors. Auf dem eingebetteten System wurde hierfür eine Zeitgeberunterbrechung (Timer/Counter-Interrupt) verwendet. Diese ruft in regelmäßigen Abständen die zentrale Funktion des Ticket Processors auf, wobei die Erzeugung der Unterbrechung über ein Hardwaremodul fest an den Systemtakt gekoppelt ist. Über die selbe Methode werden auch Zeitstempel aus dem Systemtakt erzeugt und an der Schnittstelle des Ticket Servers zur Verfügung gestellt. Auf dem Messrechner werden Funktionen des vorhandenen Betriebssystems verwendet, um die Systemzeit auszulesen und in regelmäßigen Intervallen den Ticket Processor zu aktivieren. Falls kein Echtzeitbetriebssystem verwendet wird, kann ein gewisser Jitter in den Aktivierungsintervallen nicht ausgeschlossen werden, dem wird allerdings durch die Ermittlung der jeweiligen aktuellen Systemzeit für die Zeitstempel begegnet, der Messzeitpunkt ist also mit ausreichend hoher Genauigkeit dokumentiert.

Die Speicherverwaltung auf dem Ticket Server ist für beide verwendete Hardwareplattformen nach dem Start des Ticket Servers statisch. Das heißt, die Listengrößen für Tickets und Protocol Control Blocks, sowie die Größe des Messwertspeichers sind nicht zur Laufzeit änderbar. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass auf dem Mikrocontroller eine dynamische Speicherverwaltung nicht zur Verfügung steht, auf der anderen Seite kann auch der Einfachheit halber zum Start des Ticket Servers der gesamte verfügbare Speicher aufgeteilt und belegt werden, da im Hintergrund keine weiteren Prozesse ausgeführt werden können. Lediglich dem Systemstack sollte ausreichend Speicher überlassen werden, da bei der Verwendung von Unterbrechungsbehandlungs-routinen und Funktionsaufrufen Daten auf dem Stack zwischengespeichert werden. Auf dem Messrechner ist eine dynamische Speicherver-

waltung zwar möglich, es wurde für die vorgliegende Implementierung allerdings auf eine solche verzichtet, um eine konsistente Lösung auf beiden Hardwareplattformen zu erhalten. In beiden Fällen ist die Ergänzung einer dynamischen Speicherverwaltung allerdings vorbereitet und kann eingefügt werden, wenn dies für eine Anwendung geboten erscheint. Die internen Listen für Tickets und Protocol Control Blocks werden vom Ticket Processor verwaltet, der Messwertspeicher wurde als Ringspeicher organisiert. Die Verwendung eines Ringspeichers hat den Vorteil, dass beim Speicherüberlauf zunächst die ältesten gespeicherten Werte überschrieben werden. Besonders in einem Messsystem ist die zweckmäßig, denn so können über einen längeren Zeitpunkt Daten aufgezeichnet werden und nur nach gemessenen Ereignissen, die von Interesse waren, Daten an ein anderes System übertragen werden. Eventuell vorher aufgezeichnete Daten gehen einfach durch Überschreiben verloren.

Mit den beschriebenen Komponenten ist die Erstellung der Grundmodule des Ticket Server Systems vorerst abgeschlossen, die Funktionalitäten für die Kommunikation und die Anbindung der Sensoren über Protokolle werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer betrachtet. Auf beiden Plattformen wurden noch Startfunktionen erstellt, welche den Ticket Server zu Beginn konfigurieren und die Verarbeitung anstoßen. Auf dem Messrechner übernimmt diese Funktion auch nach dem Abschluss einer Messung das Zusammentragen aller Messdaten und führt zu diesem Zeitpunkt auch die Bildverarbeitungsfunktionen (5.5.6) zur Ermittlung des Betätigungswegs aus.

5.5.3 Kommunikationsmodule für die Verbindung

Als Kommunikationsmodule wurden auf beiden Plattformen jeweils zwei mögliche Schnittstellen implementiert: eine Datenübertragung über die UART-Schnittstelle mit dem Übertragungsstandard RS-232, sowie das Profil für die serielle Schnittstelle einer Bluetooth-Funkstrecke. Die RS-232-Übertragung stellt eine möglichst einfache und ausreichend schnelle Schnittstelle zwischen dem mobilen System und dem Messrechner dar, des Weiteren kommuniziert auch die Steuerung des elektrischen Antriebs im technischen Prüfsystem über die serielle Schnittstelle mit dem Messrechner. Für eine Funkverbindung zwischen dem eingebetteten System und dem Messrechner wurde der Bluetooth-Standard ausgewählt, da für diesen voll integrierte Module in Hardware verfügbar sind, die eine serielle Schnittstelle emulieren können, aber mit sehr einfacher Hardware auskommen. Auf der anderen Seite stehen auch für PCs zahlreiche Erweiterungsmodule zur Verfügung, die wiederum über Treiber über das Betriebssystem angesprochen werden können. Andere Funkchnittstellen wie ZigBee oder WirelessLAN verfügen zwar in einzelnen Bereichen über bessere Eigenschaften sind aber entweder hardwaretechnisch komplexer zu realisieren oder weniger gut als vorgefertigte Module verfügbar. Daher ist der Bluetooth-Standard als sinnvolle Kompromisslösung zu sehen.

Die Verwendung einer RS-232-Schnittstelle stellt weder auf der Seite des eingebetteten Systems noch auf den PC-Seite ein Problem dar. Die Übertragung wird nach der Konfiguration der Übertragungsart und der gewünschten Übertragungsgeschwindigkeit durch in sich geschlossene Hardwaremodule ohne Beteiligung des Prozessors abgewickelt. Auf der Mikrocontrollerseite müssen lediglich einige Register ausgelesen und beschrieben werden, auf der Seite des Messrechners wird die Verwendung der seriellen Schnittstelle durch Betriebssystemfunktionalitäten unterstützt. Die Implementierung für beide Hardwareplattformen beschränkt sich daher auf die Konfiguration zum Start des Ticket Servers und die Abbil-

dung der vorhandenen Schnittstellen in die beiden Funktionen `sendData` und `receiveData`. Für die Realisierung der Datenübertragung mit Bluetooth als Übertragungsstandard wurde ein Hardwaremodul für die Integration in das Datenerfassungssystem für den menschlichen Test verwendet. Dieses Modul implementiert den Bluetooth-Protokollstapel (Abb. 5.13) und stellt über die Übertragungsschicht *RFCOMM* (*Radio Frequency Communication*) das *Serial Port Profile* bereit. Mit diesem Profil kann eine serielle Schnittstelle mit bidirektionaler Übertragung inklusive der Steuerleitungen emuliert werden.

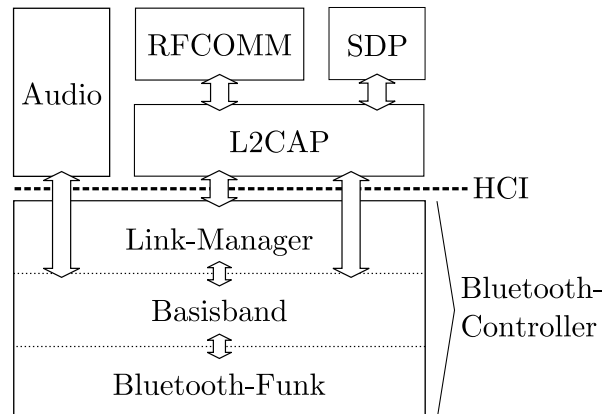


Abbildung 5.13: Bluetooth-Protokollstapel

Das eingesetzte Modul verwendet den Chipsatz von *LMX9820A* des Herstellers National Semiconductor und integriert auf dem Modul noch eine Antenne. Damit kann es ohne weiteren Entwicklungsaufwand in der bestehenden Hardware eingesetzt werden. Der Entwicklungsaufwand konnte auf die Implementierung des Verbindungsaufbaus zu einer bekannten Gegenstelle beschränkt werden, für das Senden und Empfangen von Daten unterstützt der verwendete Chipsatz einen sogenannten *transparenten Modus*. Dieser kann nach einem erfolgreichen Verbindungsaufbau dazu verwendet werden, eine serielle Schnittstelle an den Anschlüssen des Moduls bereitzustellen, über die dann Daten versendet und empfangen werden können. Auf der Seite des Messrechners wurde ein handelsüblicher Bluetooth-Adapter mit USB-Anschluss verwendet, der über die vom Hersteller mitgelieferten Treiber angesprochen wurde. Für die Abbildung der Schnittstellen zum Ticket Server auf der PC-Seite wurden Funktionen für den Verbindungsaufbau und die Kommunikation erstellt. Diese sind wie die Implementierung der seriellen Schnittstelle als Kommunikationsmodul implementiert.

In Versuchen mit den implementierten Funktionen ohne die Verwendung des Ticket Server Systems wurden durchschnittliche Datenraten von bis zu 92,14kbit/s bei untersuchten Reichweiten zwischen 1m und 15m ermittelt. Dies bleibt zwar hinter der theoretisch erreichbaren Datenrate von 1MBit/s weit zurück, allerdings ist bei diesen Versuchen auch zu beachten, dass es sich hier um die Betrachtung der Nutzdaten handelt und damit nicht um die Brutto-Übertragungsrate. Übertragungsfehler wurden nicht festgestellt, allerdings werden diese auch intern im eingebetteten Bluetooth-Modul und in den verwendeten Treibern durch Prüfsummen erkannt und gegebenenfalls korrigiert. Eine wichtige Größe ist noch die Latenz zwischen dem Absenden eines Datums und dem Empfang desselben Datums auf der Gegenseite. Dazu wurde auf dem Mikrocontroller eine Testanwendung erstellt, die

eingegangene Zeichen wieder an den Sender zurück übermittelt. Die Zeit zwischen dem Versand eines Zeichens vom Messrechner und dem erneuten Empfang des gleichen Zeichens am Messrechner wurde gemessen, um so ein Maß für die Latenz zu gewinnen.

Fenstergröße	Übertragungsrate		
	Durchschnitt	Latenz	Std.-Abw.
1	0,313kbit/s	24,4ms	8,37ms
10	1,53kbit/s	27,1ms	9,61ms
100	24,4kbit/s	32,5ms	12,9ms
1000	91,99kbit/s	86,55ms	13,44ms

Tabelle 5.4: Latenz bei der Datenübertragung mit Bluetooth

Die Versuche wurden über einen Zeitraum von jeweils 30s durchgeführt, der Übertragungsabstand betrug 1m. Die in Tabelle 5.4 dargestellten Ergebnisse bei der Untersuchung müssen allerdings noch unter der Betrachtung des Parameters der Fenstergröße interpretiert werden. Grundsätzlich läuft die Übertragung der Daten beim Bluetooth-Standard paketerorientiert ab. Daher kann bei der Übertragung mit den verwendeten Modulen festgelegt werden, wie viele Zeichen beim Senden in Paketen zusammengefasst werden sollen. Wird die Fenstergröße sehr klein gewählt, sinkt die Übertragungsrate und die gemessene Latenz. Die gemessenen Werte zeigen allerdings, dass der Versand einer Synchronisierungsnachricht für die Systemzeiten nur bedingt über Bluetooth durchführbar ist. Eine Möglichkeit ist hier die Feststellung der Latenz bei einer kleinen Fenstergröße und die anschließende Berücksichtigung beim Versand der tatsächlichen Synchronisierungsnachricht. Allerdings ist auch die Standardabweichung zu beachten, welche eine sichere Bestimmung der Latenz für die Synchronisierungsnachricht zumindest in Frage stellt. Aus diesem Grund wurde eine Synchronisierung bei einer bestehenden Verbindung über RS-232 bevorzugt.

5.5.4 Verwendete Protokoll PlugIns

Die verschiedenen zu implementierenden Protokoll PlugIns folgen direkt aus den verwendeten Sensoren. Hier waren grundsätzlich vier verschiedene Protokolle abzubilden: der SPI(serial peripheral interface)-Anschluss des AD-Wandlers zur Ermittlung des Kraftmesswerts, das I²C-Protokoll für den Beschleunigungssensor, sowie eine Verbindung zum Aufnahmesystem von der verwendeten Kamera und eine Verbindung zur Antriebssteuerung des Linearantriebs.

Die Erstellung eines Protokoll PlugIns für die SPI-Schnittstelle lässt sich mit der vorhandenen Hardwareunterstützung auf dem Mikrocontroller leicht durchführen. Über einige Register des Controllers wird das SPI-Modul des Mikrocontrollers konfiguriert und das Modul aktiviert. Die Kommunikation mit dem AD-Wandler wird durch Senden von Zeichen an den Wandler initiiert, im gleichen Schritt werden vom SPI-Modul die gewandelten Daten empfangen. Diese können wiederum aus den Registern des Controllers gelesen werden. Weiter vereinfacht wird die Implementierung durch den Umstand, dass das Protokoll nur für die Verwendung mit einem einzigen Sensor (also dem angeschlossenen Wandler) genutzt wird und dieser auch nicht von sich aus aktiv wird. Damit reduzieren sich die Sensorverwaltung und das Protokollhandling auf ein Minimum.

Auch die Einbindung der ausgewählten Kamera als Protokoll PlugIn und angeschlossene-

nen Sensor ist vergleichsweise einfach zu realisieren, sodass die Implementierung auf dem Messrechner lediglich konfiguriert und gestartet werden muss. Nach dem Start nimmt die Kameraanwendung selbstständig Bilder auf und legt diese auf der Festplatte des Rechners ab. Die Kameraanwendung sorgt auch dafür, dass zu jedem aufgezeichneten Bild ein Zeitstempel erstellt wird. Die Kamera selbst ist über den USB-Bus mit dem Rechner verbunden, für die Kamera stellt der Hersteller einen Treiber bereit, über den die Kommunikation abgewickelt werden kann. Das Protokoll Plugin dient in diesem Fall als Verbindung zur Ansteuerung des Treibers und zum Einlesen der Bilder nach Abschluss des Messvorganges. Nach dem der Messvorgang beendet ist, werden über das Protokoll PlugIn alle Bilder eingelesen und aus den Bildern der Betätigungsweg des Schalters bei der Interaktion ermittelt (siehe 5.5.6).

Für die Verbindung zum Regler des Linearantriebs wurde ebenfalls eine Schnittstelle implementiert, um bei der Untersuchung eines Prüflings das Positionsmesssystem im Antrieb für die Messung des Betätigungswegs verwenden zu können und eine Trajektorie für die Betätigung im Antrieb hinterlegen zu können. Auch in diesem Fall müssen vom Protokoll PlugIn außer der Kommunikation für die Konfiguration zu Beginn und das Zurücklesen der protokollierten Positionswerte vom Antrieb keine wesentlichen Aufgaben erledigt werden. Der Grund hierfür ist, dass der Antriebsregler selbst die Daten während der Fahrt durch die Trajektorie aufzeichnet und diese erst am Ende des Messvorgangs zur Verfügung stehen. Als Besonderheit kann beim Antriebsregler noch festgehalten werden, dass der Start des Messvorgangs hier nicht nur als Befehl über die serielle Schnittstelle gegeben werden kann, sondern auch eine Hardwareschnittstelle existiert, über die der Beginn der Messung synchronisiert gestartet werden kann. Dies wurde ebenfalls durch eine direkte Verbindung zwischen dem Kraftmesssystem und dem Antriebsregler realisiert. Im Fall des technischen Untersuchungssystems ist eine Kabelverbindung zwischen den verschiedenen Teilen des Systems sowieso keine Einschränkung. Die Kommunikation zum Antriebsregler wurde über die RS-232-Schnittstelle des Messrechners realisiert, die Kommunikation wird durch ein einfaches zeichenorientiertes Protokoll, welches der Hersteller des Reglers vorgibt, realisiert.

Wesentlich komplexer in der Implementierung stellt sich die Anbindung des I²C-Bus und damit des Beschleunigungssensors dar. Der I²C-Bus wurde ursprünglich von Philips Semiconductors entwickelt, um innerhalb von komplexen elektronischen Systemen verschiedene Schaltungsteile miteinander zu verbinden. Bei dem I²C-Bus handelt es sich um einen zweidrahtigen seriellen multimasterfähigen Datenbus. Verbindungen zwischen zwei Geräten werden stets als Master-Slave-Verbindungen adressbasiert hergestellt. Für die hier diskutierte Aufgabe kann für die Implementierung die Einschränkung gemacht werden, dass es nur einen Master im System gibt, dieser Master ist der Mikrocontroller. Sensoren wie der Beschleunigungssensor werden als Slave betrieben. Die Verwendung des I²C-Bus auf dem mobilen Teil des Datenerfassungssystems hat auch den Vorteil, dass ohne große Hardwareänderungen weitere Sensoren bzw. Speicher oder Displays in das System integriert werden können. Diese werden dann ebenfalls über den Bus und das Protokoll PlugIn im System eingebunden. Der Versand und der Empfang von Daten über den Bus gliedert sich nun immer in mehrere Phasen: zunächst muss der Bus arbitriert werden, bevor im Anschluss der gewünschte Kommunikationsteilnehmer adressiert werden kann. Nach einer erfolgreichen Adressierung können dann Daten vom Master gesendet werden oder vom Slave empfangen werden. Diese beiden Vorgänge werden als *Master Send* und *Master Receive* bezeichnet. Da auch für den I²C-Bus auf dem Mikrocontroller eine Hardwareunterstützung

existiert (Atmel verwendet hier die Bezeichnung *TWI (Two Wire Interface)* welche aber kompatibel zum I²C-Bus ist), muss nicht der gesamte Vorgang durch das Protokoll PlugIn abgewickelt werden. Lediglich der Übergang zwischen den verschiedenen Zuständen und vor allem auch eventuell auftretende Fehlerzustände müssen durch das Protokoll PlugIn behandelt werden. Dazu speichert das Protokoll PlugIn jeweils die aktuell durchzuführende Aktion und wickelt den Vorgang im Hintergrund mit einer Unterbrechungsbehandlung ab. Nachdem Lesevorgänge abgeschlossen sind, wird dem Ticket Processor dies signalisiert, um eine Verarbeitung der Daten durch das entsprechende Ticket zu gewährleisten. Für den verwendeten Beschleunigungssensor wurden Methoden für die Konfiguration und den Betrieb als Datenquelle erstellt, der Sensor kann nun über den Ticket Processor angesprochen und verwendet werden.

5.5.5 Implementierte Tickets für Messaufgaben

Für die Realisierung der unterschiedlichen Vorgänge auf dem Datenerfassungssystem wurden insgesamt sechs verschiedene Tickets implementiert. Dabei entfallen vier der Tickets auf das eingebettete System, die beiden anderen Tickets werden auf dem Messrechner benötigt.

Auf dem eingebetteten System wird der gesamte Erfassungsvorgang durch die Instanziierung eines einzigen Konfigurationstickets gestartet. Dieses ähnelt stark dem in 5.4.6 vorgestellten Konfigurations-Ticket. Abweichend davon werden mit dem Konfigurationsticket allerdings zwei Protokoll PlugIns registriert - eines für den über SPI und AD-Wandler angeschlossenen Kraftsensor und ein zweites für den I²C-Bus und den angeschlossenen Beschleunigungssensor. Im Anschluss werden beide Sensoren registriert und konfiguriert, sowie je ein Ticket für den Kraftsensor und den Beschleunigungssensor instanziiert. Damit sind die Aufgaben des Konfigurationstickets abgeschlossen, es wird mit dem Endzustand markiert und kann verlassen werden.

Die beiden Erfassungstickets sind jeweils für die Betreuung der zugeordneten Sensoren zuständig. Das Ticket für den Kraftsensor ähnelt dabei stark dem in 5.4.6 vorgestellten Ticket für Mehrfachmessungen, allerdings wird hier nicht automatisch nach einer bestimmten Anzahl Messpunkten die Erfassung beendet, sondern das Ticket existiert so lange, bis es von extern beendet wird. Das Ticket für den Beschleunigungssensor ist ebenfalls ein Ticket für Mehrfachmessungen, allerdings ist dieses nicht zeitaktiviert, sondern ereignisaktiviert, da im Beschleunigungssensor eine bestimmte Datenrate zur Erfassung eingestellt werden kann, mit der dann auch das Protokoll PlugIn Daten vom Sensor bezieht. Sind neue Daten verfügbar, so erfasst dieses Ticket die neuen Daten zusammen mit einem Zeitstempel. Beide Tickets speichern fortlaufend die neu erfassten Daten in den Ringpuffer im Ticket Server.

Zur Beendigung der Messung kommt ein spezielles Ticket zum Einsatz, das beide Messungstickets beendet und im Anschluss alle erfassten Daten aus dem Speicher liest und die Daten anschließend über die Kommunikationsschnittstelle zum Messrechner überträgt. Dieses spezielle Ticket hat die Besonderheit, dass es eine sehr lange Ausführungszeit der Ticket Service Function benötigt. Damit kann es auch die Zeitschranken des Ticket Processors verletzen, was allerdings keine größere Rolle spielt, da zu diesem Zeitpunkt keine Messungen mehr laufen oder Komponenten im System vorhanden sind, die eine spezielle Betreuung nötig machen würden. Wäre dies der Fall, so müsste das Übertragungsticket so formuliert werden, dass es immer nur eine kleine Menge Daten aus dem Messwertespeicher liest und diese überträgt. Dies würde eine Einhaltung der Zeitschranken wieder möglich

machen.

Auf dem Messrechner existieren nur zwei sehr einfache Tickets, welche die Aufzeichnung im Kamerasystem starten, bzw. beim technischen Messsystem den Antriebsregler konfigurieren und nach Ende der Messung die erfassten Daten aus den beiden Datenquellen lesen und an die verwaltende Anwendung auf dem Messrechner zur Speicherung übergeben.

5.5.6 Ermittlung des Betätigungswegs durch Bildverarbeitung

Die Messung des Betätigungswegs bei der Untersuchung durch den Menschen soll wie in 5.2.3 geschildert durch die Verarbeitung von Bildern geschehen, die während der Interaktion des menschlichen Testers mit dem Prüfling aufgezeichnet werden. Dabei wird der bewegliche Schalterteil von der Seite durch eine Kamera beobachtet, für eine Messumgebung wurde der in Abbildung 5.14 skizzierte Aufbau verwendet.

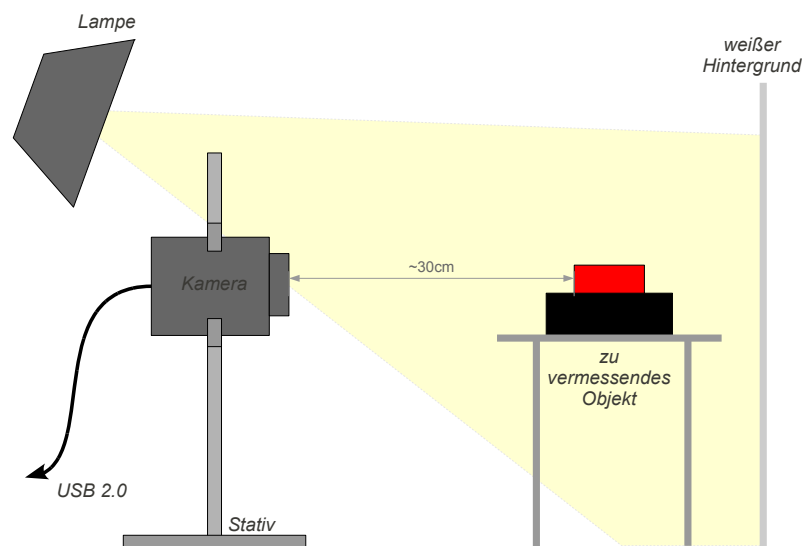


Abbildung 5.14: Skizze des Aufbaus für die Vermessung des Betätigungswegs

Für die Auswertung der Bilder nach dem Betätigungsweg sind nun grundsätzlich zwei Ansätze denkbar: die Beobachtung der Fingeposition im Bild oder die Beobachtung der Schalteroberfläche im Bild. Die Beobachtung des Fingers selbst hat den Vorteil, dass auch die Bewegung des Menschen vor dem Berühren des Schalters ermittelt werden kann. Dabei kann auch auf eine Betätigungsrichtung geschlossen werden und gegebenenfalls die Einrichtung für die technische Untersuchung verändert werden. Allerdings weist diese Vorgehensweise zumindest bei der Verwendung vom Finger alleine (also ohne den Aufsatz zur Kraftmessung) den Nachteil auf, dass sich der Finger bei der Berührung des Schalters verformt und damit Aussagen über den Zusammenhang zwischen der Fingerposition und der Position des beweglichen Schalterteils sehr schwierig zu gewinnen sind. Des Weiteren

wird versucht, durch eine Einschränkung des Sichtfelds auf den Schalter, die vorhandene Auflösung der Kamera möglichst gut auszunutzen. Dadurch kann die Fingerbewegung nur sehr begrenzt beobachtet werden und der Finger ist im Allgemeinen auch nicht komplett sichtbar. Der zweite Ansatz ist die direkte Beobachtung der Position des beweglichen Schalterteils im aufgezeichneten Bild. Bei dieser Vorgehensweise ist die Bewegung des Fingers selbst nur eingeschränkt beobachtbar, allerdings kann durch die direkte Positionsbestimmung der Schalteroberfläche der Betätigungsweg wesentlich sicherer ermittelt werden. Schließlich sind auch die Ergebnisse der Messung im zweiten Fall sehr gut überprüfbar, wenn die technische Untersuchungseinrichtung eingesetzt wird, um den Schalter zu aktivieren. Die Daten vom Positionsmesssystem des Antriebs und die von der Bildverarbeitung ermittelten Positionen können dann direkt miteinander verglichen werden. Aus diesen angeführten Gründen wurde die Beobachtung des beweglichen Schalterteils für die Vermessung des Betätigungswegs ausgewählt.

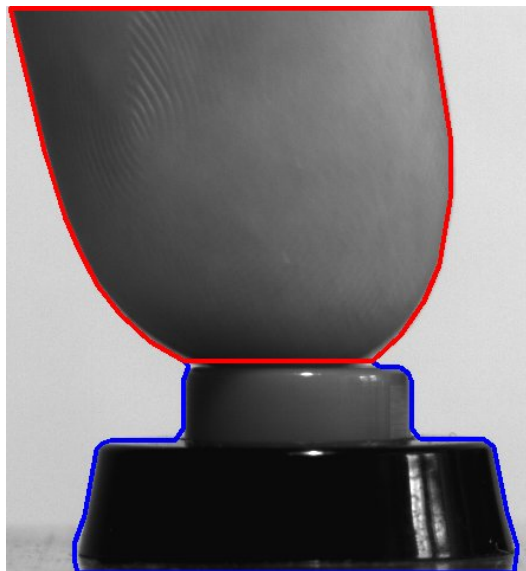
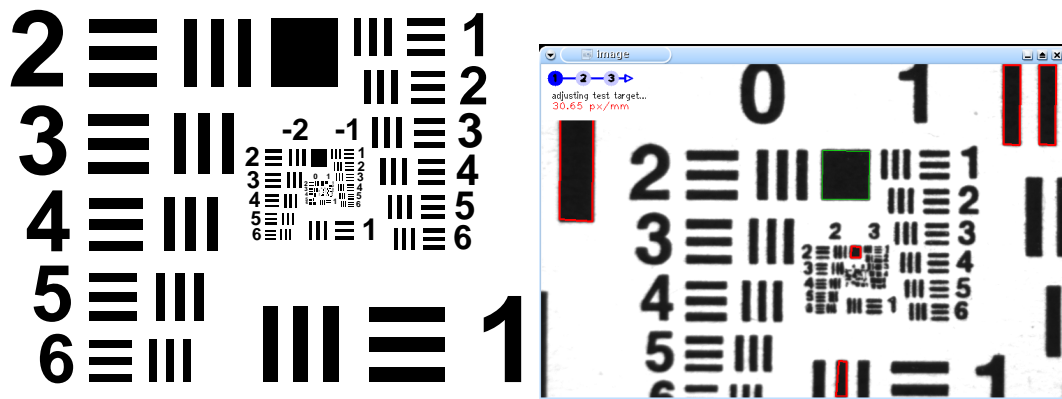


Abbildung 5.15: Typisches Bild bei der Vermessung (Finger und Schalter markiert)

Die Idee für die Extraktion des Betätigungswegs aus den Bildern bei der Interaktion (Abb. 5.15) ist nun die Bestimmung der (im Bild) senkrechten Seitenlänge am beweglichen Schalterteil. Grundsätzlich wäre auch die Beobachtung der Oberseite des beweglichen Schalterteils möglich, allerdings besteht hier das Problem, dass sich diese Linie im Bild abhängig von Beleuchtung und Farbgebung des Schalters im Bild kaum vom betätigenden Finger oder Fingeraufsatz unterscheiden lässt.

Zunächst muss das Verhältnis zwischen Pixeln im Kamerabild und tatsächlichen Längeneinheiten im Bild ermittelt werden. Dazu wurde das sogenannte USAF-1951 Test-Target (Abb. 5.17a (a)) verwendet. Dieses Muster besitzt geometrische Formen mit einem festgelegten Größenverhältnis untereinander und einer festen Absolutgröße. Zur Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Bildpixeln und einem Längenmaß wird das Test-Target im selben Abstand zur Kamera aufgenommen wie das spätere Messobjekt. Das erhaltene Bild kann nun automatisch nach den bekannten Merkmalen durchsucht werden und liefert im Anschluss das Verhältnis zwischen einer Längenangabe in $[mm]$ und den Bildpixeln zurück. Während dieses Vorgangs kann auch die Fokussierung des Kameraob-

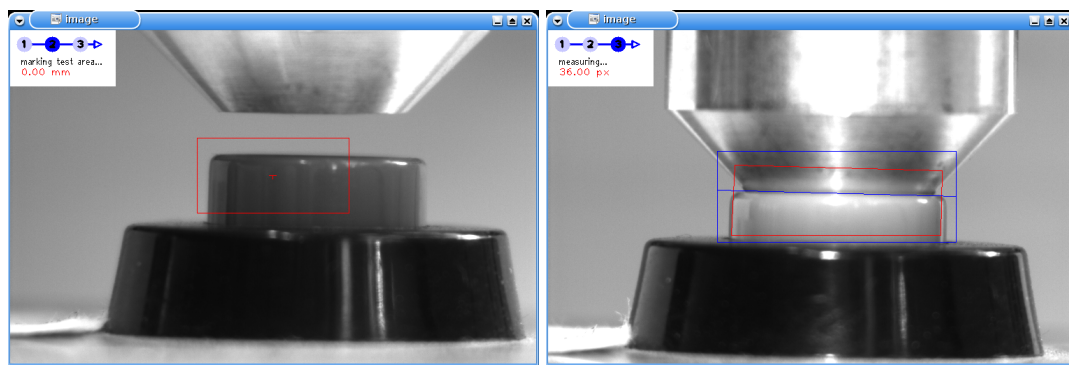
ektivs auf die zu beobachtende Szene überprüft und bei Bedarf angepasst werden.



(a) USAF-1951-Target, nicht maßstabsgerecht (b) Automatische Auswertung des Targets

Abbildung 5.16: Bestimmung der Pixelgröße mit einem Test-Target

Zur Vorbereitung der Messung wird vom Nutzer eine sogenannte *Region of Interest (ROI)* (in Abb. 5.17 (a) rot dargestellt) definiert, in welcher der bewegliche Schalterteil sich befindet. Dieser Schritt hilft bei der Analyse des gesamten Bildes und stellt keine entscheidende Einschränkung im Einsatz dar, da eine Untersuchung sowieso durch Einrichtung des Messplatzes bzw. Einbau des Schalters in eine Halterung vorzubereiten ist. Daraufhin werden die tatsächlichen Begrenzungslinien des beweglichen Schalterteils automatisch gefunden und die Region of Interest dementsprechend verkleinert. Die neue ROI (in Abb. 5.17 (b) rot dargestellt) umfasst nun lediglich noch den beweglichen Schalterteil mit dessen seitlichen Begrenzungen und endet am feststehenden Schalterteil.



(a) Markierung der Region of Interest

(b) Nachführung der Region of Interest

Abbildung 5.17: Markierung und Veränderung der Region of Interest

Bei der Messung selbst wird das Bild zunächst durch eine Glättung vorverarbeitet, im Anschluss wird mit Hilfe eines Kantenfilters die gesamte Kontur bestehend aus beweglichem Schalterteil und eventuell aufgesetztem Finger extrahiert. Die so gewonnene Kontur wird nun auf Ecken untersucht und geeignete Ecken für die Messung ausgewählt. Die Auswahl passender Eckpunkte geschieht über deren Abstand zu den, in der Vorbereitung bestimmten, seitlichen Grenzen der Region of Interest. Diese Ecken bilden anschaulich Enden der

senkrechten Begrenzungslinien des beweglichen Schalterteils. Setzt man nun die Position der Oberkante des Schalters als Referenz an, kann die Position des beweglichen Schalterteils über den Interaktionsvorgang hinweg bestimmt und direkt als Längenmaß ausgegeben werden.

Die Entwicklung der Methoden zur Bestimmung des Betätigungswegs wurde auf dem Messrechner durchgeführt, dabei wurde auf die ursprünglich von Intel entwickelte *Open Computer Vision Library (OpenCV)* zurückgegriffen. Diese Bibliothek stellt Algorithmen zur Bildverarbeitung und Informationsextraktion bereit. Diese Vorgehensweise war für die Entwicklung zweckmäßig und stellt keine Verletzung des Prinzips dar, möglichst unabhängig von externen Softwareframeworks zu bleiben. Die OpenCV Library kann auf verschiedenen Plattformen eingesetzt werden, ein Transfer der erstellten Bildverarbeitungssoftware auf ein eingebettetes System ist auf Grund der nötigen Rechenleistung und des Speicherbedarfs sowieso nicht sinnvoll. Für die Implementierung wurde auf den Sprachstandard C++ zurückgegriffen und für die unterschiedlichen Teile der Verarbeitungskette eigene Klassenmodule erstellt. Dadurch wird eine Verwendbarkeit im Zusammenhang mit dem in 5.4.2 diskutierten Softwaresystem unterstützt und auch eine Erweiterbarkeit für veränderte Aufgabenstellungen gewährleistet.

Für die Evaluierung der Bildverarbeitungslösung wurden die erstellten Klassen zu einer Gesamtanwendung zusammengefügt und diese mit einer Nutzeroberfläche versehen. Parallel dazu wurde der Linearantrieb verwendet, um eine definierte Trajektorie bei der Betätigung eines Schalters abzufahren. Aus den aufgezeichneten Bildern wird dann der Betätigungsweg ermittelt und zusammen mit dem Zeitstempel der Bilder abgelegt. Durch den Vergleich der Daten aus der Bildverarbeitung und den im Antriebsregler protokollierten Positionsdaten kann dann eine Aussage über die Qualität der ermittelten Werte gemacht werden. Die Struktur des Verarbeitungsablaufs bei der Evaluierung ist in Abbildung 5.18 schematisch dargestellt.

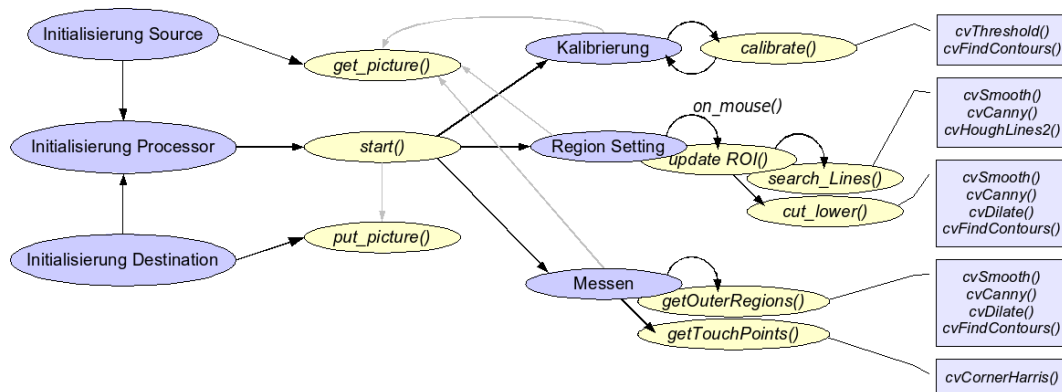


Abbildung 5.18: Ablauf der Bildverarbeitungsanwendung bei der Evaluierung

Zur Evaluierung wurden nun verschiedene Versuche durchgeführt, die Ergebnisse zweier exemplarischer Versuche sind in Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20 dargestellt. Es wurde ein Schalter mit einem Gesamtbetätigungsweg von 3mm verwendet, als Trajektorien kamen verschiedene Kurvenformen zum Einsatz. Bei der Kalibrierung der Pixelmaße wurde ein Verhältnis von $\frac{1mm}{31px} \approx 0,033 \frac{mm}{px}$ ermittelt.

In den beiden gezeigten Versuchen mit einer rampenförmigen und einer sinusförmigen Trajektorie wurden die, in Tabelle 5.5 zusammengestellten, Abweichungen zwischen Ori-

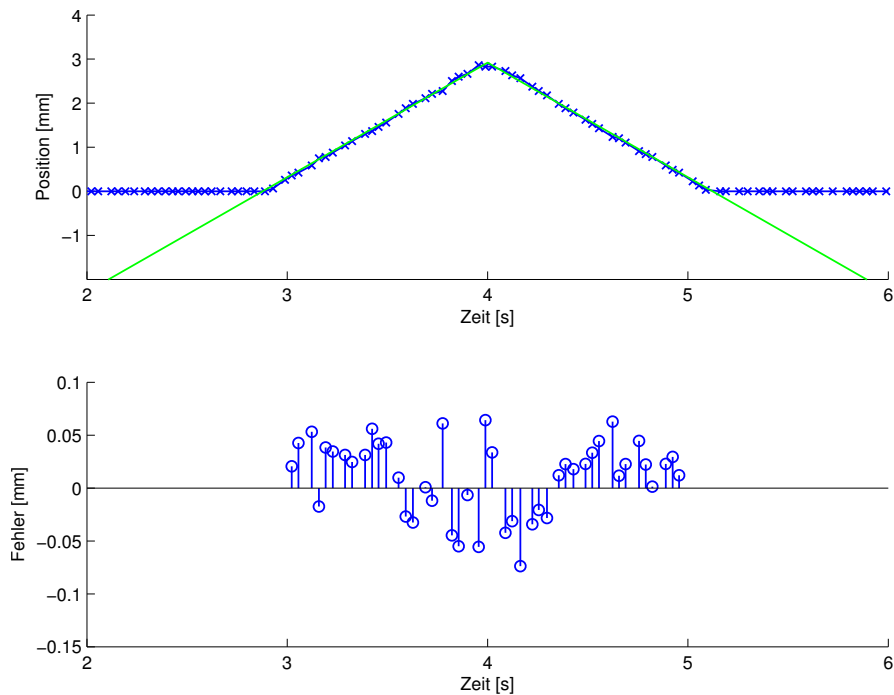


Abbildung 5.19: Messabweichungen des Bildverarbeitungssystems bei rampenförmiger Trajektorie

ginaltrajektorie und der mit dem Bildverarbeitungssystem bestimmten Trajektorie festgestellt. Betrachtet wird die Abweichung zwischen den Punkten der gefahrenen Trajektorie des Antriebs x_{Traj} und den vom Bildverarbeitungssystem gelieferten Werten x_{BV} .

Trajektorie	Abweichung $e = x_{Traj} - x_{BV}$		
	Mittelwert \bar{e}	Standardabweichung $\sigma(e)$	Betragsmittelwert $ \bar{e} $
Rampe	0,0109mm	0,0354mm	0,0322mm
Sinus	-0,0064mm	0,0456mm	0,0302

Tabelle 5.5: Ergebnisse bei der Evaluierung des Bildverarbeitungssystems

Die Evaluierungsergebnisse zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit des gewählten Bildverarbeitungssystems für den menschlichen Test. Sowohl die maximale Abweichung, abgesehen von Ausreißern an den Grenzen des Messbereichs, als auch die zeitliche Anordnung der gemessenen Werte zur abgefahrenen Trajektorie liegen für die Interaktion des menschlichen Bedieners in einem durchaus akzeptablen Bereich. In der Evaluierung wurde die Analyse parallel zur Erfassung der Daten durchgeführt, daher kann die Bildrate noch gesteigert werden, indem zunächst alle Bilder aufgezeichnet werden und erst im Anschluss die Analyse durchgeführt wird.

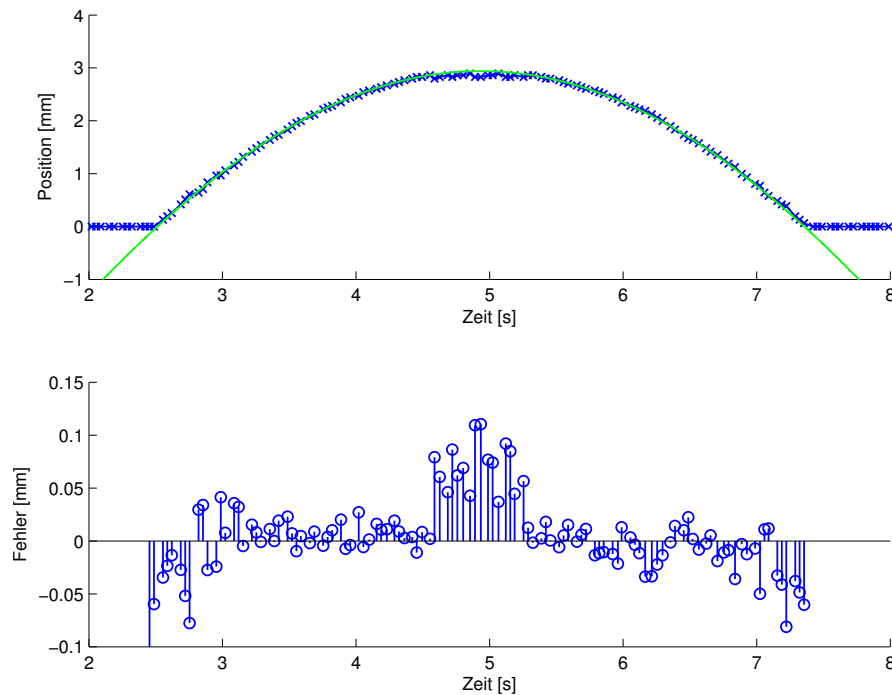


Abbildung 5.20: Messabweichungen des Bildverarbeitungssystems bei rampenförmiger Trajektorie

5.6 Geeignete Darstellung von Messdaten

Für die technische Interpretation von Messdaten aus dem System können verschiedene Darstellungen erzeugt werden, die eine einfache der gewonnenen Informationen vereinfachen sollen. Die grundlegende Darstellung, welche bei speziell bei der Herstellung von Schaltern verwendet wird, ist eine einfach Kraft-Weg-Kennlinie, welche bei der Aktuierung des Schalters durch eine Prüfeinrichtung oder einen menschlichen Tester entsteht (Abb. 5.21). Diese Darstellung erlaubt hauptsächlich eine Überprüfung von Vorgaben an ein herzustellendes Produkt und gibt in dieser Form keinerlei Aufschluss darüber, auf welche Art und Weise der Schalter aktuiert wurde oder wie sich das Verhalten bei einer anderen Betätigungsart ändert. Nichtsdestotrotz ist die Kraft-Weg-Kennlinie eine wichtige Grundlage für den Einsatz des Analysesystems als Messsystem für den technischen Test.

Daraus abgeleitet wurde eine andere Darstellungsart, welche ebenfalls für die technische Interpretation geeignet ist, allerdings mehr Information enthält. Diese komplexeren Kraft-Weg-Zeit-Kennlinien (in Abb. 5.22 beispielhaft dargestellt) enthalten zusätzlich zur Kraft-Weg-Kennlinie noch den Faktor Zeit. Dadurch wird neben der reinen Betrachtung der Kraftentwicklung über dem Betätigungsweg auch die verwendete Art der Aktuierung sichtbar. Im Beispielfall sind dies Rampen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bei der Aktuierung. Ändert sich so die Kraft, welche der Schalter durch seinen internen Aufbau der Aktuierung entgegensetzt über die eingesetzte Betätigungskraft, wird dies nun auch in der Kraft-Weg-Kennlinie sofort sichtbar. Die dreidimensionale Darstellung vereint alle drei Projektionen und färbt die verschiedenen Trajektorien nach dem elektrischen Schaltzustand des betrachteten Prüflings ein.

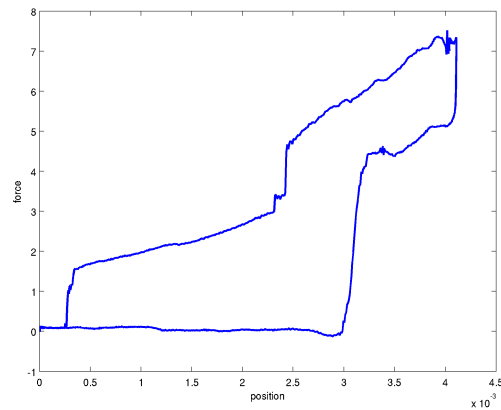


Abbildung 5.21: Kraft-Weg-Kennlinie (Kraft in $[N]$, Position in $[m]$)

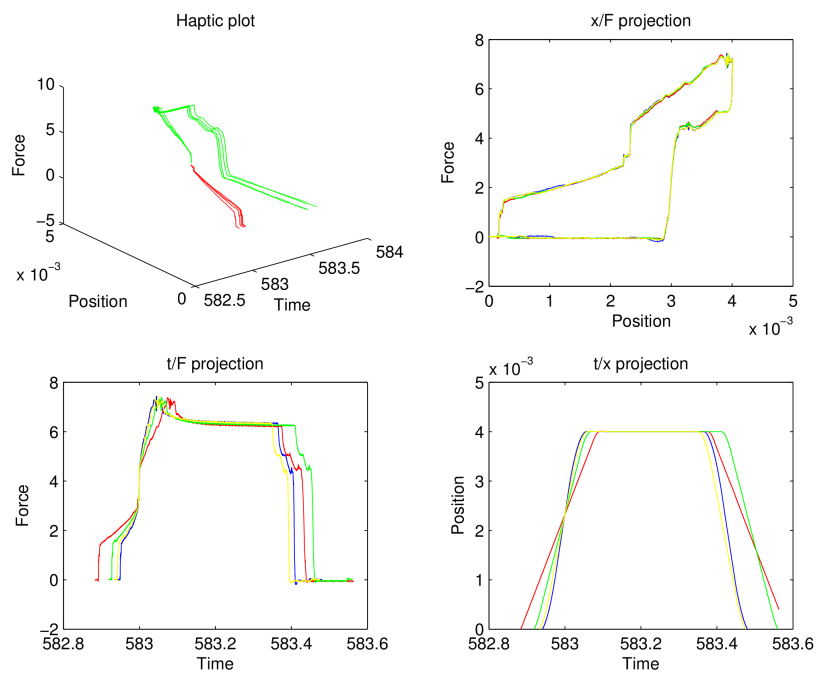


Abbildung 5.22: Mehrdimensionale Kraft-Weg-Zeit-Kennlinie (Kraft in $[N]$, Weg in $[m]$, Zeit in $[s]$)

Kapitel 6

Psychophysikalisches Analysemodell

Der Analyseschritt im Framework für die Haptikanalyse (vgl. Kapitel 4) erfordert die Verwendung eines Modells, welches die menschliche Wahrnehmung zu einem gewissen Grad nachbildet. Aufbauend auf den Erkenntnissen in der Psychophysik (Kapitel 3) konnten in der Vergangenheit bereits auch mathematische Modelle für verschiedene Aspekte der menschlichen Wahrnehmung erstellt werden. Ein solches Modell, welches dem Gebiet der Psychoakustik entstammt, wird im Folgenden vorgestellt. Dieses Modell zeichnet sich auch dadurch aus, dass es mit einer vollständigen mathematischen bzw. systemtheoretischen Beschreibung versehen ist. Für die Berechnung wird das vorgestellte Modell dann in eine geeignete Form gebracht und eine Implementierung beschrieben.

6.1 Erstellung eines frequenzselektiven psychophysikalischen Modells

Da die menschliche haptische Wahrnehmung einen frequenzselektiven Charakter in ihren Rezeptoren aufweist (siehe Tabelle 3.1) und ein möglichst biologisch motiviertes System für die Analyse der haptischen Eigenschaften verwendet werden sollte, wurde nach einem geeigneten Analysesystem gesucht (vgl. Braun et al. (2008b)). In anderen Gebieten der Psychophysik werden solche Modelle verwendet, da auch hier der Zusammenhang zwischen Reizen und Empfindungsgrößen ermittelt werden soll. Auf dem Gebiet der Psychoakustik konnte schließlich ein Modell für die menschliche Wahrnehmung gefunden werden, welches zum Einen auf frequenzselektiven Filtern basiert und über das zum Anderen auch bereits Erkenntnisse vorliegen.

Beim menschlichen Gehör wird zwar die Frequenzselektivität durch den Aufbau des Ohres und die Struktur des Innenohrs realisiert und die mechanisch umgesetzten Reize von sehr vielen untereinander gleichen Nervenzellen aufgenommen, allerdings ist die Struktur der Analyse verschiedener Frequenzbereiche durch mehrere Rezeptoren vergleichbar. Sogar die wahrgenommenen Frequenzbereiche liegen in vergleichbaren Größenordnungen. In den folgenden Unterabschnitten wird daher der Peripheral Ear Transducer (PET) als Modell für die psychophysikalische Analyse beschrieben und auch eine vorgenommene Implementierung vorgestellt.

6.1.1 Der Peripheral Ear Transducer (PET)

Der Peripheral Ear Transducer (vgl. Terhardt (1998)) ist ein Modell für die gehörgerechte Analyse von Schallsignalen. Bei der Beschreibung psychoakustischer Beobachtungsergebnisse ist es nicht notwendig, alle physikalischen und physiologischen Vorgänge und Gegebenheiten exakt nachzubilden. Es wird vielmehr ein Modell verwendet, dessen Struktur und Parameter so bestimmt sind, dass ein Verständnis bzw. die Nachbildung psychoakustischer Empfindungsgrößen möglich wird.

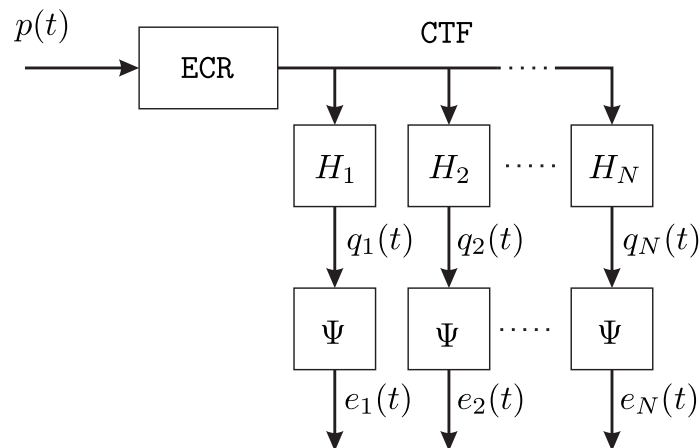


Abbildung 6.1: Struktur des Peripheral Ear Transducer (PET)

Der Peripheral Ear Transducer (Abb. 6.1) besteht aus den folgenden Komponenten :

- Einem Filter zur Nachbildung von Resonanzen im Gehörgang (Ear Canal Resonances), welches im Folgenden als ECR-Filter bezeichnet wird. Das Eingangssignal $p(t)$ dieses Filters ist das Schallsignal, welches am Ohr anliegt.
- Einer Reihe von Filterkanälen, welche die frequenzselektive Verarbeitung in der Cochlea repräsentieren. Zusammengefasst ergeben diese die N -kanalige Übertragungsfunktion der Cochlea (CTF Cochlear Transmission Function).
- Aus den Ausgangssignalen $q_n(t)$ der CTF-Kanäle werden die psychoakustischen Erregungen $e_n(t)$ berechnet. Die Berechnungsvorschrift Ψ ist eine nichtlineare Abbildung, die für alle Kanäle gleich ist.

Die Struktur des PET beruht auf Untersuchungen der physiologischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs mit einigen vereinfachenden Annahmen. So wird zum Beispiel die Frequenzselektivität lediglich durch eine, im Vergleich zum realen Gehör verkleinerte, Anzahl von Kanälen abgebildet. Bei einer geeigneten Struktur und Parametrierung der Einzelfilter stellt dies aber bei der Berechnung keine Einschränkung dar. Die Struktur der Einzelfilter, sowie die Wahl einer geeigneten Parametrierung sind in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Eine der grundlegendsten Hörwahrnehmungen ist zum Beispiel die *Lautheit*. Sie ist das subjektive Maß für den Schallpegel eines wahrgenommenen akustischen Signals. Untersucht man die Lautheit, so stellt man fest, dass Sinustöne mit gleichem Schallpegel und verschiedenen Frequenzen von Testpersonen mit einer unterschiedlichen Lautheit bewertet

werden. Weiterhin stellt man fest, dass die Lautheit mit wachsendem Pegel des dargebotenen Schalls monoton wächst. Die Zunahme der Lautheit ist bei kleinen Pegeln dabei stärker als bei großen Pegeln. Da die Lautheit für die Kalibrierung des gesamten PET eingesetzt wird und eine überprüfbare Größe für den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Implementierung darstellt, wurde sie als Beispiel in der Berechnung ausgewählt.

6.1.2 Filter des PET-Systems

Das in 6.1.1 vorgestellte PET-System teilt sich in die funktionellen Teile ECR, CTF und Erregungsberechnung auf. Die Systemstruktur dieser funktionellen Teile wird in diesem Abschnitt genauer beleuchtet und die Berechnung der einzelnen Signale im PET-System erläutert.

Gehörgangresonanzen (ECR)

Die Wirkung der Gehörgangresonanzen tritt in der Absoluthörschwelle bei ungefähr 3,3kHz und 10kHz in Erscheinung (nach Terhardt (1998)). Zur Nachbildung dieser Wirkung im PET-System wird ein zweistufiges Filter $H_{ECR}(s) = H_{r,1}(s) \cdot H_{r,2}(s)$ verwendet. Als Übertragungsfunktion eines Einzelfilters wird die Funktion

$$H_r(s) = 1 + \alpha \frac{s}{s^2 + 2as + a^2 + \omega_0^2} \quad (6.1)$$

verwendet. Die Impulsantwort eines ECR-Einzelfilters lautet dementsprechend

$$h_r(t) = \delta(t) + \alpha e^{-at} \left(\cos(\omega_0 t) - \frac{a}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right). \quad (6.2)$$

Darin sind α eine reelle Konstante, a ein reeller Dämpfungsfaktor und ω_0 eine, die Resonanz kennzeichnende, Eigenfrequenz. Der Betragsfrequenzgang ergibt sich zu

$$|H_r(j\omega)| = \sqrt{1 + \frac{\alpha^2 + 4a\alpha}{\left(\frac{a^2 + \omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4a^2}} \quad (6.3)$$

Bei der Kreisfrequenz $\omega_r = \sqrt{a^2 + \omega_0^2}$ erreicht der Amplitudengang sein Maximum $|H_r|_{max} = 1 + \alpha/(2a)$. Auf die Wahl der Parameter für das ECR-Filtersystem wird näher in 6.1.3 eingegangen.

Cochleare Übertragungsfunktion (CTF)

Jeder der N Kanäle des CTF-Filters besteht aus einer Kette jeweils gleicher Einzelfilter. Die Fourier-Übertragungsfunktion des CTF-Filterkanals n lautet

$$H_n(\omega) = \left(\frac{a_n^2 + \omega_n^2}{a_n^2 + 2ja_n\omega_n - \omega^2 + \omega_n^2} \right)^k. \quad (6.4)$$

Die dazugehörige Impulsantwort eines Einzelfilters ist durch

$$h_n(t) = \frac{a_n^2 + \omega_n^2}{\omega_n} e^{-a_n t} \sin(\omega_n t) \quad (6.5)$$

gegeben. In (6.4) und (6.5) sind a_n eine reelle Dämpfungskonstante, ω_n die Filter-Eigenfrequenz und k die Anzahl der verketteten Einzelfilter pro Kanal. Die so definierte Kanalübertragungsfunktion hat den Amplitudengang

$$|H_n(\omega)| = \left(\frac{a_n^2 + \omega_n^2}{\sqrt{(a_n^2 + \omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4a_n^2\omega^2}} \right)^k. \quad (6.6)$$

Dieser nimmt den Maximalwert

$$|H_n|_{max} = \eta_n^k = \left(\frac{a_n^2 + \omega_n^2}{2a_n\omega_n} \right)^k = \left(\frac{2a_n^2 + \omega_{C,n}^2}{2a_n\sqrt{a_n^2 + \omega_{C,n}^2}} \right)^k \quad (6.7)$$

bei der charakteristischen Kreisfrequenz

$$\omega_{C,n} = \sqrt{\omega_n^2 - a_n^2} \quad (6.8)$$

an. Da die charakteristische Frequenz f_C und die geforderte Resonanzüberhöhung η_n die maßgeblichen Parameter bei der Dimensionierung der CTF-Filter-Kanäle sind, wird nun noch (6.7) nach dem Dämpfungsbeitrag a_n aufgelöst:

$$a_n = \sqrt{2\pi} f_{C,n} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{1}{\eta_n^2 - 1}} - 1} \quad (6.9)$$

Des Weiteren wird noch die 3dB-Bandbreite als effektive Bandbreite B_n eines CTF-Kanals betrachtet. Es handelt sich hier um die Differenz der beiden Frequenzen, bei denen der Amplitudengang noch den $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fachen Wert, des Maximums aufweist.

$$B_n = \frac{\sqrt{\omega_n^2 - a_n^2}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{4a_n^2\omega_n^2 (\sqrt[k]{2} - 1)}{(\omega_n^2 - a_n^2)^2}}} \quad (6.10)$$

Als Parameter, welche bei der Dimensionierung bestimmt werden müssen, verbleiben die Anzahl der Kanäle N , die Anzahl der verketteten Einzelfilter pro Kanal k , die Resonanzüberhöhung für jeden Kanal η_n und die charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$ der Kanäle. Die Auswahl bzw. Bestimmung der Parameter wird in 6.1.3 durchgeführt.

Psychoakustische Erregung

Die bisher betrachteten Komponenten des PET-Systems bilden die physikalischen Gegebenheiten, sowie die Umsetzung der physikalischen Größen in Reize ab. Die Umsetzung von Nervenreizen in Empfindungen folgt in Bereichen, die eine genügende Entfernung zu Schwellen aufweisen, dem Potenzgesetz (siehe Gleichung (3.2)).

Durch Betrachtung von Absolut- und Unterschiedsschwellen erhält man das folgende erweiterte Potenzgesetz (nach Terhardt (1998)) für prothetische Empfindungsgrößen:

$$R = \begin{cases} \rho \left(\frac{S_A}{\sigma-1} \right)^\kappa \left[\left(\frac{S(\sigma-1)}{S_A} + 1 \right)^\kappa - \sigma^\kappa \right] & , S \geq S_A \\ 0 & , S < S_A \end{cases} \quad (6.11)$$

Darin bedeutet S_A die Absolutschwelle für den betrachteten Reiz, ρ eine reelle Konstante, κ eine reelle Potenz, welche charakteristisch für die Empfindung ist und σ den sogenannten Schwellenquotienten. Dieser wiederum setzt sich aus der Absolutschwelle, sowie dem Eigenrauschen (interner Stimulus) S_i zusammen:

$$\sigma = \frac{S_A + S_i}{S_i} \quad (6.12)$$

Da es sich bei den Ausgangssignalen $e_n(t)$ des PET-Systems (Abb.6.1) um Empfindungen handelt, wenn man nur einen einzigen Kanal betrachtet, kann man für jeden Kanal mit Gleichung (6.11) den Ansatz

$$\Psi : e_n(t) = \begin{cases} \rho_n \left(\frac{Q_A}{\sigma-1} \right)^\kappa \left[\left(\frac{(\sigma-1)\tilde{q}_n(t)}{Q_A} + 1 \right)^\kappa - \sigma^\kappa \right] & , \tilde{q}_n(t) \geq Q_A \\ 0 & , \tilde{q}_n(t) < Q_A \end{cases} \quad (6.13)$$

machen (vgl. Terhardt (1998)). Darin ist ρ_n eine reelle Konstante, welche für jeden Kanal einen unterschiedlichen Wert haben kann. Die Bedeutung von κ und Q_A entspricht den, bei Gleichung (6.11) erläuterten, Größen. Auf die Wahl der Parameter für die Berechnung der psychoakustischen Erregung wird in 6.1.3 eingegangen.

Für die Effektivwertbildung wird eine zeitvariante quadratische Mittelwertbildung ähnlich der RMS-Methode (*Root Mean Square*) verwendet.

$$\tilde{q}_n(t) = \sqrt{\frac{1}{T_{RMS}} \int_{t-T_{RMS}}^t q_n^2(\tau) d\tau} \quad (6.14)$$

Lautheit

Die Lautheit kann aus den Ausgängen der CTF-Kanäle $e_n(t)$ durch Summation bestimmt werden, da es sich bei der psychoakustischen Erregung im Kanal n schon um die Intensitätsempfindung für diesen Kanal handelt. Man unterscheidet noch zwischen instantaner Lautheit

$$N_i(t) = \sum_{n=1}^N e_n(t) \quad (6.15)$$

und zeitbewerteter Lautheit.

$$N(t) = \frac{1}{T_N} \int_{t-T_N}^t N_i(\tau) d\tau. \quad (6.16)$$

Die Zeitkonstante T_N bzw. die Anzahl n_N der Werte, über welche gemittelt werden soll, ist zwischen $25ms$ und $50ms$ zu wählen. Die Einheit der Lautheit ist [*sone*]. Das System wird so kalibriert (siehe 6.2.5), dass ein Sinuston mit der Frequenz $1 kHz$ und dem Pegel $40 dB$ eine Lautheit von $1 sone$ hervorruft, dies entspricht der Definition der Einheit für die Lautheit.

6.1.3 Dimensionierung des PET-Systems

ECR-Filter

Für die Dimensionierung der ECR-Filter sind nach Terhardt (1998) die in Tabelle aufgeführten Werte zu verwenden. Diese werden für die Parameter in einer zweifachen Hintereinanderschaltung von Gleichung (6.1) verwendet.

	$\alpha[1]$	$\omega_0[s^{-1}]$	$a[s^{-1}]$
$H_{r,1}$	10000	20000	5000
$H_{r,2}$	20000	65000	20000

Tabelle 6.1: Parameterwerte für die ECR-Filter

CTF-Filter

Die Dimensionierung der CTF-Filter gestaltet sich wesentlich komplizierter als die Dimensionierung der ECR-Filter, da mit der CTF sowohl die Frequenzselektivität, als auch das Übertragungsverhalten des Innenohrs (genauer der Cochlea) abgebildet werden muss.

Zunächst werden Werte für die Anzahl der Kanäle N und die Anzahl der Einzelfilter pro Kanal k gewählt. Je größer man N wählt, um so näher kommt man den physiologischen Gegebenheiten des Ohrs. Es ist aber aus Gründen der Rechenkapazitäten nur schwer möglich, eine Anzahl von Kanälen zu wählen, welche dem Ohr entspricht. Eine relativ niedrige Anzahl (< 1000) von Kanälen reicht aus, um sinnvolle Analysen durchführen zu können. Je höher man k wählt, um so klarer werden die Kanäle gegeneinander abgegrenzt, der Amplitudengang des Einzelkanals wird steiler. Die beiden Parameter werden zusammen so gewählt, dass sich ein gut approximierendes Verhalten ergibt.

Als Nächstes wird die Bestimmung der Resonanzüberhöhungen η_n^k bei bekannten charakteristischen Frequenzen der Kanäle $f_{C,n}$ vorgenommen. Die Resonanzüberhöhungen werden so eingestellt, dass sie die frequenzabhängige Sensitivität des menschlichen Gehörs abbilden. Die Basis für die Bestimmung der Resonanzüberhöhungen ist die Absoluthörschwelle. Diese wird zunächst um den Einfluss der Gehörgangresonanzen bereinigt, sodass sich der nachfolgende Verlauf der Absoluthörschwelle für Sinus-Dauertöne ergibt:

$$L_A^*(f) [dB] = 3,64 \left(\frac{f}{1000 \text{ Hz}} \right)^{-0,8} + 10^{-3} \left(\frac{f}{1000 \text{ Hz}} \right)^4 \quad (6.17)$$

Die Resonanzüberhöhungen der Kanäle η_n^k sollen nun dem inversen Verlauf der Absoluthörschwelle folgen, sodass die Beziehung

$$L_A^*(f) = L_0 - 20 \lg(\eta_n^k(f_C = f)) \text{ dB} \quad (6.18)$$

gilt. Dabei bezeichnet L_0 einen festen Bezugspegel, den man durch das Festsetzen einer Referenzüberhöhung $\eta^k(f_{C,0})$ bei einem Referenzton mit der Frequenz $f_{C,0}$ erhält. Die Referenzüberhöhung wird mit $L_r = 20 \lg(\eta^k(f_{C,0}))$ bezeichnet. Als Referenzfrequenz wird $f_{C,0} = 1000 \text{ Hz}$ gewählt. Für L_0 ergibt sich daher Folgendes:

$$\begin{aligned} L_0 &= L_A^*(f_{C,0}) + 20 \lg(\eta_n^k(f_{C,0})) \text{ dB} \\ &= 3,64 \text{ dB} + 10^{-3} \text{ dB} + L_r \end{aligned} \quad (6.19)$$

Setzt man nun die Gleichungen (6.17) und (6.19) in Gleichung (6.18) ein und löst nach η_n auf, so erhält man die Bestimmungsgleichung (ohne Einheiten)

$$\lg \eta_n = \frac{L_r}{20k} + \frac{0,182}{k} \left(1 - \left(\frac{f_{C,n}}{1000} \right)^{-0,8} \right) + \frac{10^{-4}}{2k} \left(1 - \left(\frac{f_{C,n}}{1000} \right)^4 \right). \quad (6.20)$$

Daraus lassen sich mit (6.9) die Dämpfungskonstanten a_n der Kanäle berechnen. Löst man nun noch Gleichung (6.8) nach den Eigenkreisfrequenzen ω_n der Filter auf und setzt die schon bekannten Größen ein, so erhält man den noch fehlenden Parameter für die vollständige Bestimmung des CTF-Kanals, die Filtereigenfrequenz der Kanäle:

$$\omega_n = \sqrt{\omega_{C,n}^2 + a_n^2} = \sqrt{(2\pi f_{C,n})^2 + a_n^2} \quad (6.21)$$

Es verbleibt nun noch die wichtige Fragestellung, wie die charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$ zu wählen sind. Eine lineare Verteilung der Kanäle auf das gesamte Hörintervall ist nicht zweckmäßig, da dies nicht mit den Gegebenheiten des menschlichen Gehörs übereinstimmt. Das menschliche Ohr besitzt eine von der Frequenz abhängige Sensitivität für die Unterscheidung von unterschiedlichen Tönen. Das heißt, zu sehr niedrigen und sehr hohen Tönen hin nimmt die Frequenzauflösung ab. In diesen Bereichen müssen weniger Kanäle angesiedelt werden, als im Bereich der hohen Sensitivität. Daher wird hier ein Verfahren gezeigt, welches es erlaubt, aus einer gegebenen Anzahl N von Kanälen und den schon diskutierten Systemeigenschaften der Kanalfilter die charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$ zu ermitteln.

Die Idee des Verfahrens besteht darin, dass die Überlappung zwischen den einzelnen Kanälen in der CTF durch einen konstanten Faktor ε dargestellt wird. Das bedeutet für zwei aufeinanderfolgenden Kanäle

$$f_{C,n+1} = f_{C,n} + \varepsilon B_n. \quad (6.22)$$

Legt man nun ein ε und die niedrigste Frequenz $f_{C,1}$ fest, so kann man daraus zunächst mit den Gleichungen (6.20) und (6.9) die Dämpfung a_1 berechnen. Daraus ergibt sich dann mit den Beziehungen (6.21) und (6.10) die Bandbreite B_1 . Diese kann dann wiederum dazu verwendet werden, die zweite charakteristische Frequenz $f_{C,2}$ zu bestimmen. So können weitere charakteristische Frequenzen bestimmt werden, bis der gewünschte Frequenzbereich abgedeckt ist. Für $\varepsilon > 1$ ergibt sich eine geringe Überlappung der Einzelkanäle, für $\varepsilon \leq 1$ liegt eine höhere Überlappung vor - die Abstände der charakteristischen Frequenzen sind in diesem Fall kleiner als die effektiven Bandbreiten.

Meist ist man aber nicht an einer Überdeckung eines gewünschten Frequenzbereichs durch Kanäle mit einer bestimmten Überlappung interessiert, sondern an einer gegebenen Anzahl N von Kanälen in einem gewünschten Frequenzbereich. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren verwendet, welches aus einem gegebenen Frequenzintervall $[f_{min}, f_{max}]$ und einer gegebenen Anzahl N von Kanälen die charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$ ermittelt. Das Verfahren ist in Abbildung 6.2 skizziert.

Der gezeigte Algorithmus basiert auf dem Prinzip der sukzessiven Approximation. Der Algorithmus ermittelt ausgehend von einem festen Startwert $\varepsilon_0 = 1$ durch Addition bzw. Subtraktion eines abnehmenden Änderungsbeitrags $\Delta\varepsilon$ ein geeignetes ε . Als Gütekriterium kommt der Betrag der relativen Abweichung zwischen dem vorgegebenen Maximalwert der Spitzenfrequenz f_{max} und ermittelter höchster Kanalfrequenz $f_{C,N}$ zur Anwendung. Unterschreitet das Gütemaß eine vorgegebene Schranke $\delta > 0$, terminiert der Algorithmus. Der Ablauf gliedert sich in zwei Phasen:

1. In der Suchphase (startup=on) wird der Änderungsbeitrag nicht modifiziert. Der Wert von ε wird in jedem Schritt um den Änderungsbeitrag erhöht, bis zum ersten Mal eine höchste Kanalfrequenz $f_{C,N}$ auftritt, die größer als f_{max} ist. Mit diesem Ereignis endet (startup=off) die Suchphase und die Approximationsphase beginnt.

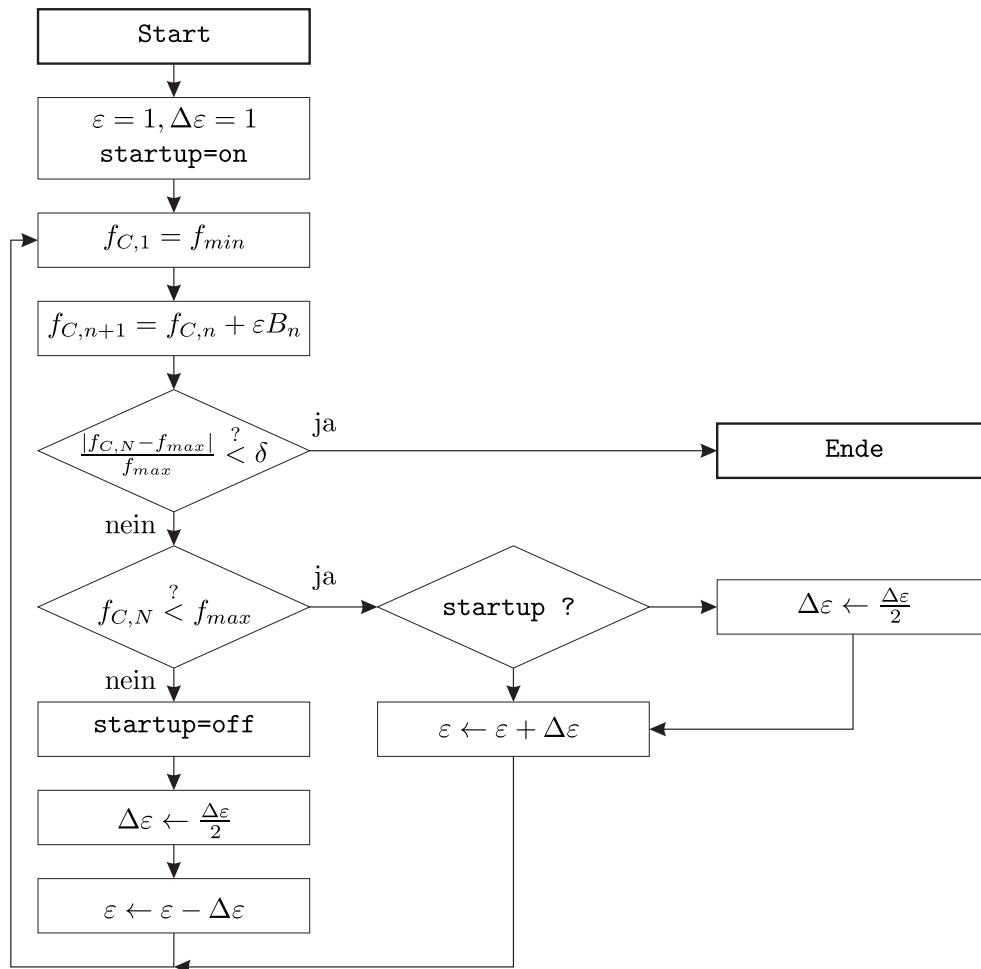


Abbildung 6.2: Algorithmus für die Dimensionierung der CTF

2. In der Approximationsphase wird in jedem Schritt der Änderungsbeitrag $\Delta\varepsilon$ halbiert. Falls $f_{C,N}$ größer als f_{max} ist, wird der neue Änderungsbeitrag von ε subtrahiert, anderenfalls wird der Änderungsbeitrag zu ε addiert. In jedem Schritt wird überprüft, ob das Gütekriterium schon die vorgegebene Schranke unterschritten hat. Ist dies der Fall, terminiert der Algorithmus mit dem ermittelten ε sowie den zugehörigen Kanalfrequenzen $f_{C,n}$.

Da $f_{C,N}$ mit wachsendem ε monoton wächst, konvergiert das, mit dem vorgestellten Algorithmus berechnete, ε auf jeden Fall gegen das optimale Ergebnis. Da die Konvergenz gegen den optimalen Wert die Abbruchbedingung des Algorithmus darstellt, ist die Terminierung desselben ebenfalls sichergestellt. Die geforderte Genauigkeit kann im Rahmen der Rechengenauigkeit der Umgebung, in welcher der Algorithmus implementiert wird, beliebig gewählt werden: $0 < \delta < 1$. Werte größer als 1 können zwar gewählt werden, sind aber nicht sinnvoll, da dies Werte zwischen f_{min} und $2f_{max}$ für $f_{C,N}$ zulassen würde. Zusammenfassend sind die folgenden Schritte bei der Dimensionierung der CTF durchzuführen:

- Wahl der Referenzüberhöhung L_r , Kanalanzahl N , Anzahl der Einzelfilter pro Kanal

k und eines Frequenzintervalls $[f_{min}, f_{max}]$

- Ermittlung der charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$ der Kanäle mit dem Dimensionierungsalgorithmus
- Bestimmung der Resonanzüberhöhungen η_n mit Gleichung (6.20)
- Bestimmung der Dämpfungskonstanten a_n mit Gleichung (6.9)
- Bestimmung der Filtereigenkreisfrequenzen ω_n aus Gleichung (6.21)

Damit sind alle Parameter der CTF in einer Weise bestimmt, die das Verhalten des menschlichen Innenohrs so approximiert, dass man eine gehörgerechte Analyse von Schallsignalen durchführen kann.

Psychoakustische Erregung

Da die Parameterwerte für die Berechnung der psychoakustischen Erregung durch Hörversuche bestimmt werden, sollen hier die in Terhardt (1998) vorgeschlagenen Werte verwendet werden. Demnach ergibt sich für den Schwellenquotienten σ ein Wert von 1,05 und für den Exponenten κ ein Wert von ungefähr 0,5. Für die Effektivwertbildung in Gleichung (6.14) werden typische Werte im Bereich $T_{RMS} = 25ms$ angegeben.

Die Absolutschwelle Q_A in (6.13) wird mit Hilfe der Referenzüberhöhung L_r berechnet:

$$Q_A = 10^{\frac{L_r + 3,3dB}{20dB}} \cdot 20\mu Pa \quad (6.23)$$

Der noch unbestimmte Faktor ρ_n kann zur Kalibrierung des PET-Systems verwendet werden (siehe 6.2.5).

6.2 Implementierung des psychophysikalischen Modells

Im Folgenden wird die Implementierung des vorgestellten psychophysikalischen Modells betrachtet. Die Implementierung selbst wurde mit Hilfe von MATLAB erstellt, das eine leistungsfähige Plattform für die Signalanalyse und Systemmodellierung darstellt. Bei der Implementierung wurde darauf geachtet eine möglichst effiziente Darstellung der Berechnung zu verwenden und auch die Umsetzung in eine Programmiersprache auf Systemebene zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde für die vorgestellte Implementierung hauptsächlich Standardprogrammkonstrukte und Matrix-Funktionen verwendet.

Der Abschnitt gliedert sich in die Vorstellung einer Rechenvorschrift, im Anschluss werden die Bestimmungsgleichungen für die Systemeingänge in eine gut handhabbare Form gebracht, um sie dann implementieren zu können. Die erstellte Implementierung wird schließlich noch mit der Kalibrierung der Lautheit überprüft.

6.2.1 Fourier-t-Transformation

In diesem Abschnitt wird eine zeitvariante Fouriertransformation, die Fourier-t-Transformation vorgestellt. Da diese für die spätere Implementierung von Bedeutung ist, wird auch auf die zeitdiskrete rekursive Berechnung der Fourier-t-Transformation eingegangen.

Durch die Fourier-Transformation

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.24)$$

wird der reellen Zeitfunktion $y(t)$ eindeutig die komplexe Frequenzfunktion $Y(f)$ zugeordnet, falls das Integral existiert.

Betrachtet man kausale Signale $p(t)$ mit endlicher Beobachtungsdauer, so erhält man folgende Signaleigenschaften von $p(t)$ (nach Terhardt (1998)):

- Durch die Beschränkung der Beobachtungszeit nimmt man das Signal vor dem Beginn der Beobachtung zu Null an: $p(t) = 0, -\infty < t < t_0$.
- Das Signal $p(t)$ ist für $t_0 \leq t \leq t_1$ durch einen geschlossenen Ausdruck oder abschnittsweise durch eine endliche Zahl geschlossener Ausdrücke beschreibbar.
- Da kausale Signale betrachtet werden, hängt der Verlauf von $p(t)$ nicht von in der Zukunft liegenden Signalverläufen ab. Das heißt, der Signalverlauf von $p(t)$ ist für $t > t_1$ irrelevant.

Aus den genannten Einschränkungen für reale, kausale Signale ergibt sich aus Gleichung (6.24) die Definition der endlichen Fouriertransformation:

$$P(f) = \int_{t_0}^{t_1} p(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (6.25)$$

Betrachtet man in Gleichung (6.25) die obere Integrationsgrenze t_1 als gleitend und berücksichtigt den Umstand, dass weiter in der Vergangenheit liegende Werte von $p(t)$ weniger stark von Interesse sind durch die Multiplikation mit einer Fensterfunktion $w(t)$ so erhält man die folgende Gleichung:

$$P(f, t) = \int_{t_0}^t p(\tau) w(t - \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6.26)$$

Die Fensterfunktion $w(t)$ ist eine reelle Funktion mit der Eigenschaft $w(t) = 0, t < 0$. Eine günstige Funktion für die weitere Berechnung ist die exponentielle Gewichtung:

$$w(t) = \begin{cases} e^{-at} & , t \geq 0 \\ 0 & , t < 0 \end{cases} \quad (6.27)$$

Aus der Zusammenfassung der Gleichungen (6.26) und (6.27) ergibt sich die Definition der Fourier-t-Transformation, welche im Folgenden als FTT bezeichnet wird:

$$P(f, t) = \int_{t_0}^t p(\tau) e^{-a(t-\tau)} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6.28)$$

Im Weiteren wird nun eine rekursive Berechnungsvorschrift für die zeitdiskrete Fourier-t-Transformation vorgestellt. Da meist nur der Absolutbetrag von $P(f, t)$ zur Signalanalyse herangezogen wird, kann man zur Vereinfachung der Berechnung auch die Frequenz-Zeitfunktion

$$P^o(f, t) = e^{j\omega t} P(f, t) = e^{j\omega t} \int_{t_0}^t p(\tau) e^{-a(t-\tau)} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6.29)$$

betrachten, welche offensichtlich den selben Absolutbetrag wie $P(f, t)$ hat ($\|e^{j\omega t}\| = 1$). Für den Übergang zu einer zeitdiskreten Darstellung werden nun mit der Abtastzeit T_s die folgenden Ersetzungen durchgeführt:

- Die kontinuierliche Zeitvariable t wird ersetzt durch $(m + 1)T_s$.
- Die untere Grenze bei der Integration wird zu Null gesetzt. Dies stellt keine Einschränkung dar, ist aber sinnvoll, da Messungen von Signalen stets zu einem bestimmten Zeitpunkt beginnen, den man als Zeitnullpunkt definieren kann.
- Aus der zeitkontinuierlichen Frequenzzeitfunktion $P^o(f, t)$ wird die zeitdiskrete Darstellung $P_m^o(f)$.
- Der kontinuierliche Verlauf von $p(t)$ wird durch eine Treppenfunktion mit den einzelnen Stufen $p_m(\sigma(mT_s) - \sigma((m + 1)T_s))$ ersetzt. Dabei bezeichnet $\sigma(t)$ die Funktion des Einheitsprinzips.

Mit den so durchgeführten Ersetzungen ergibt sich aus Gleichung (6.29) die zeitdiskrete Darstellung:

$$P_m^o(f) = \int_0^{(m+1)T_s} \left(\sum_{i=0}^m p_i (\sigma(iT_s) - \sigma((i+1)T_s)) \right) e^{-a((m+1)T_s - \tau)} e^{j2\pi f((m+1)T_s - \tau)} d\tau \quad (6.30)$$

$$\begin{aligned} P_m^o(f) &= \sum_{i=0}^m p_i \int_{iT_s}^{(i+1)T_s} e^{-(a-j\omega)((m+1)T_s - \tau)} \\ &= \frac{1}{a - j\omega} \sum_{i=0}^m p_i \left(e^{-(a-j\omega)T_s(m-i)} - e^{-(a-j\omega)T_s(m+1-i)} \right) \\ &= \frac{1 - e^{-(a-j\omega)T_s}}{a - j\omega} \sum_{i=0}^m p_i e^{-(a-j\omega)T_s(m-i)} \end{aligned} \quad (6.31)$$

Um von Gleichung (6.31) zu einer rekursiven Berechnungsvorschrift zu gelangen, wird der Übergang von $m \rightarrow m + 1$ betrachtet und mit dem Zeitschritt m verglichen.

$$\begin{aligned} P_{m+1}^o(f) &= \frac{1 - e^{-(a-j\omega)T_s}}{a - j\omega} \sum_{i=0}^{m+1} p_i e^{-(a-j\omega)T_s((m+1)-i)} \\ &= \frac{1 - e^{-(a-j\omega)T_s}}{a - j\omega} \left[\left(e^{-(a-j\omega)T_s} \sum_{i=0}^m p_i e^{-(a-j\omega)T_s(m-i)} \right) - p_{m+1} \right] \\ P_{m+1}^o(f) &= e^{-(a-j\omega)T_s} P_m^o(f) + \frac{1 - e^{-(a-j\omega)T_s}}{a - j\omega} p_{m+1} \end{aligned} \quad (6.32)$$

Mit Beziehung (6.32) ist nun eine rekursive Berechnungsvorschrift für die zeitdiskrete Fourier-t-Transformation gefunden. Diese hat allerdings noch den Nachteil, dass in ihr Operationen mit komplexen Zahlen vorkommen. Im Hinblick auf die Betragsbildung und

eine spätere Implementierung auf einem Rechner ist es sinnvoll, die Berechnungsvorschrift in Realteil und Imaginärteil aufzuspalten. Dazu werden folgende Beziehungen verwendet :

$$P_{m+1}^o(f) = X_{m+1} + jY_{m+1} \quad (6.33)$$

$$e^{a+jb} = e^a(\cos(b) + j \sin(b)) \quad (6.34)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (6.33) und (6.34) ergibt sich aus der Beziehung (6.32) der sogenannte FTT-Algorithmus (vgl. Terhardt (1998)).

$$X_{m+1} = e^{-aT_s} (X_m \cos(\omega T_s) - Y_m \sin(\omega T_s)) + \frac{p_{m+1}}{a^2 + \omega^2} (a - e^{-aT_s} (a \cos(\omega T_s) - \omega \sin(\omega T_s))) \quad (6.35)$$

$$Y_{m+1} = e^{-aT_s} (X_m \sin(\omega T_s) + Y_m \cos(\omega T_s)) + \frac{p_{m+1}}{a^2 + \omega^2} (\omega - e^{-aT_s} (\omega \cos(\omega T_s) + a \sin(\omega T_s))) \quad (6.36)$$

$$|P_{m+1}(f)| = +\sqrt{X_{m+1}^2 + Y_{m+1}^2} \quad (6.37)$$

Mit dem FTT-Algorithmus ist nun eine effektive Berechnung der Betragsfunktion des zeitvarianten Spektrums möglich, zum Anderen bietet der hier dargestellte Algorithmus große Vorteile bei der Berechnung von Größen im PET-System (siehe 6.1.2).

6.2.2 Digitale Berechnung des PET-Systems

Für die geeignete Darstellung des PET-Systems auf einem Rechner wird noch einmal die Frequenz-Zeitfunktion aus Gleichung (6.29) betrachtet. Dabei wird die untere Grenze bei der Integration t_0 zu 0 gesetzt. Formt man die Beziehung um und teilt sie mit Hilfe von (6.34) in Realteil und Imaginärteil auf, so erhält man

$$\begin{aligned} P^o(f, t) &= e^{j\omega t} \int_0^t p(\tau) e^{-a(t-\tau)} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\ &= \int_0^t p(\tau) e^{-a(t-\tau)} e^{j2\pi f(t-\tau)} d\tau \\ &= \int_0^t p(\tau) e^{-a(t-\tau)} \cos(2\pi f(t-\tau)) d\tau \\ &\quad + j \int_0^t p(\tau) e^{-a(t-\tau)} \sin(2\pi f(t-\tau)) d\tau. \end{aligned} \quad (6.38)$$

Vergleicht man (6.38) mit dem Faltungsintegral der Funktionen $f(t)$ und $g(t)$,

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t-\tau) d\tau, \quad (6.39)$$

so stellt man fest, dass sich der Realteil und der Imaginärteil von $P^o(f, t)$ jeweils durch ein Faltungsintegral darstellen lassen. Da $p(t)$ außerhalb des Intervalls $[0, t]$ zu 0 gesetzt wurde, nehmen auch die Integrationsgrenzen in (6.39) die Werte 0 und t an:

$$\begin{aligned} P^o(f, t) &= p(t) * (e^{-at} \cos(\omega t)) + j (p(t) * (e^{-at} \sin(\omega t))) \\ &= X(f, t) + jY(f, t) \end{aligned} \quad (6.40)$$

In einem LTI(*linear time invariant*)-System mit dem Zeitverlauf der Eingangsgröße $p(t)$ und der Übertragungsfunktion $F(s)$ kann der Zeitverlauf der Ausgangsgröße $q(t)$ durch die Multiplikation von Übertragungsfunktion und Laplace-Transformierter der Eingangsgröße $P(s) \bullet \circ p(t)$ im Frequenzbereich ermittelt werden. Da die Multiplikation im Frequenzbereich zur Faltung im Zeitbereich korrespondiert, erhält man den Zeitverlauf der Ausgangsgröße auch durch Faltung von Impulsantwort $f(t) \circ \bullet F(s)$ und Zeitverlauf der Eingangsgröße (vgl. Kiencke (1998)).

$$Q(s) = F(s) \cdot P(s) \quad \bullet \circ \quad q(t) = f(t) * p(t) \quad (6.41)$$

ECR-Filter

Unter Beachtung von Gleichung (6.41) und (6.40) kann nun für die Berechnung der Ausgangsgröße eines ECR-Einzelfilters die Beziehung

$$q_{ECR}(t) = p_{ECR}(t) + \alpha X \left(\frac{\omega_0}{2\pi}, t \right) + \frac{\alpha a}{\omega_0} Y \left(\frac{\omega_0}{2\pi}, t \right) \quad (6.42)$$

verwendet werden. Beim Übergang in den zeitdiskreten Bereich wird Gleichung (6.42) zu

$$q_{ECR,m} = p_{ECR,m} + \alpha X_m + \frac{\alpha a}{\omega_0} Y_m. \quad (6.43)$$

Das bedeutet für die zeitdiskrete Berechnung des Ausgangs eines ECR-Einzelfilters können die Gleichungen (6.35) und (6.36) des FTT-Algorithmus zur Anwendung kommen.

CTF-Filter

Für das CTF-Einfachfilter ergibt sich analog zur Betrachtung des ECR-Einfachfilters

$$q_{CTF,m} = \frac{a_n^2 + \omega_n^2}{\omega_n} Y_{m+1}. \quad (6.44)$$

Psychoakustische Erregung

Bei der Effektivwertberechnung im zeitdiskreten Bereich geht das Integral (6.14) in eine Summe über:

$$\tilde{q}_m^{(n)} = \sqrt{\frac{1}{n_{RMS}} \sum_{k=m-n_{RMS}+1}^m (q^{(n)k})^2} \quad (6.45)$$

Dabei wird n_{RMS} so gewählt, dass $T_{RMS} = n_{RMS} \cdot T_s$ gilt.

Die zeitdiskrete psychoakustische Erregung geht aus Gleichung (6.13) durch die Ersetzung $\tilde{q}_n(t) \rightarrow \tilde{q}_{n,m}$ hervor :

$$\Psi : e_m^{(n)} = \begin{cases} \rho_n \left(\frac{Q_A}{\sigma-1} \right)^\kappa \left[\left(\frac{(\sigma-1)\tilde{q}_m^{(n)}}{Q_A} + 1 \right)^\kappa - \sigma^\kappa \right], & \tilde{q}_m^{(n)} \geq Q_A \\ 0, & \tilde{q}_m^{(n)} < Q_A \end{cases} \quad (6.46)$$

Für die Bestimmung der Lautheit können die folgenden zeitdiskreten Berechnungsvorschriften verwendet werden, die aus den Gleichungen (6.15) und (6.16) hervorgehen:

$$N_{i,m} = \sum_{n=1}^N e_m^{(n)} \quad (6.47)$$

$$N_m = \frac{1}{n_N} \sum_{k=m-n_N+1}^m N_{i,k} \quad (6.48)$$

6.2.3 Berechnung der Filter

Die Kernaufgabe bei der Implementierung des PET-Systems liegt in der Berechnung der ECR- und CTF-Filter, sowie in deren Dimensionierung. Um eine angemessene Rechenzeit und Speicherauslastung zu erreichen, muss der FTT-Algorithmus aus Abschnitt 6.2.1 in eine geeignete Darstellung überführt werden. Der FTT-Algorithmus bildet nach Abschnitt 6.2.2 die Grundlage bei der Berechnung der Filter im PET-System.

Betrachtet man die Gleichungen (6.35) und (6.36) mit den Ersetzungen $a \rightarrow a_n$ und $\omega \rightarrow \omega_n$, so stellt man fest, dass sie zusammen in eine Art Zustandsraumdarstellung transferiert werden können:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{m+1} \\ Y_{m+1} \end{bmatrix} &= e^{-a_n T_s} \begin{bmatrix} \cos(\omega_n T_s) & -\sin(\omega_n T_s) \\ \sin(\omega_n T_s) & \cos(\omega_n T_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{a_n^2 + \omega_n^2} \\ &\begin{bmatrix} a_n - e^{-a_n T_s} (a_n \cos(\omega_n T_s) - \omega_n \sin(\omega_n T_s)) \\ \omega_n - e^{-a_n T_s} (a_n \sin(\omega_n T_s) + \omega_n \cos(\omega_n T_s)) \end{bmatrix} p_{m+1} \end{aligned} \quad (6.49)$$

Führt man nun einige neue Bezeichnungen

$$\begin{aligned} \underline{\chi}_m &= \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \end{bmatrix} \\ \underline{A}_n &= e^{-a_n T_s} \begin{bmatrix} \cos(\omega_n T_s) & -\sin(\omega_n T_s) \\ \sin(\omega_n T_s) & \cos(\omega_n T_s) \end{bmatrix} \\ \underline{b}_n &= \frac{1}{a_n^2 + \omega_n^2} (\underline{I} - \underline{A}_n) \begin{bmatrix} a_n \\ \omega_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.50)$$

ein (\underline{I} ist die Einheitsmatrix), so erhält man aus Gleichung (6.49) die wesentlich vereinfachte Darstellung

$$\underline{\chi}_{m+1} = \underline{A}_n \underline{\chi}_m + \underline{b}_n p_{m+1}. \quad (6.51)$$

Mit dieser Darstellung des FTT-Algorithmus können nun die Filterausgänge des ECR-Filters, sowie des CTF-Filters in einer praktischen Art und Weise berechnet werden.

ECR-Filter

Das ECR-Filter besteht nach Abschnitt 6.1.2 aus zwei verketteten Einfachfiltern. Für die Bestimmung des Ausgangssignals $q_{ECR,m}$ wird das Eingangssignal des PET-Systems p_m

in das erste Filter eingespeist und erzeugt dort das Ausgangssignal $q_m^{(r_1)}$. Dieses wird als Eingangssignal $p_m^{(r_2)}$ des zweiten Filters verwendet. Der Ausgang $q_m^{(r_2)}$ des zweiten Filters ist schließlich das gesuchte Signal $q_{ECR,m}$. In Abbildung 6.3 ist der Zusammenhang zur Verdeutlichung grafisch dargestellt.

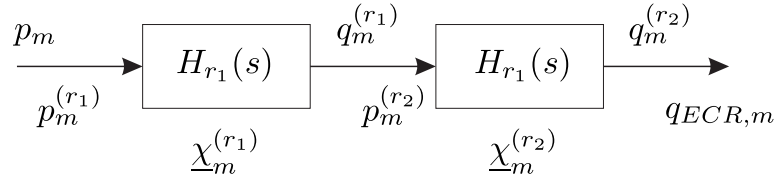


Abbildung 6.3: Struktur und Signale beim ECR-Filter

Um nun aus den Zustandsvektoren $\underline{\chi}_m^{(r_1)}$ und $\underline{\chi}_m^{(r_2)}$ die Ausgänge der Filter $q_m^{(r_1)}$ und $q_m^{(r_2)}$ zu ermitteln, muss das System aus Gleichung (6.51) noch um eine Ausgangsgleichung erweitert werden. Im Fall des ersten ECR-Einfachfilters lautet die Ausgangsgleichung nach (6.43) in Vektornotation

$$\begin{aligned} q_{m+1}^{(r_1)} &= \begin{bmatrix} \alpha_{r_1} & \frac{\alpha_{r_1} a_{r_1}}{\omega_{r_1}} \end{bmatrix} \underline{\chi}_{m+1}^{(r_1)} + 1 \cdot p_{m+1}^{(r_1)} \\ &= \underline{c}_{r_1} \underline{\chi}_{m+1}^{(r_1)} + d_{r_1} p_{m+1}^{(r_1)}. \end{aligned} \quad (6.52)$$

Die Ausgangsgleichung für das zweite ECR-Einfachfilter ist analog aufgebaut. Unter Beachtung der Verkettung der Einzelfilter lässt sich ein, aus den beiden Einzelfiltern kombiniertes, System angeben:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{\chi}_{m+1}^{(r_1)} \\ \underline{\chi}_{m+1}^{(r_2)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \underline{A}_{r_1} & 0 \\ \underline{b}_{r_2} \underline{c}_{r_1} & \underline{A}_{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\chi}_{m+1}^{(r_1)} \\ \underline{\chi}_{m+1}^{(r_2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{b}_{r_1} \\ \underline{c}_{r_1} \underline{b}_{r_1} + d_{r_1} \end{bmatrix} p_{m+1} \\ q_{ECR,m+1} &= \begin{bmatrix} d_{r_2} \underline{c}_{r_1} & \underline{c}_{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\chi}_{m+1}^{(r_1)} \\ \underline{\chi}_{m+1}^{(r_2)} \end{bmatrix} + d_{r_1} d_{r_2} p_{m+1} \end{aligned} \quad (6.53)$$

Das entstandene System lässt sich mit einigen neu definierten Symbolen auch übersichtlicher als Eingrößensystem mit vier internen Zuständen darstellen. Die Symbole $\underline{\chi}_m^{(r)}$, \underline{A}_r , \underline{b}_r , \underline{c}_r und d_r entsprechen den Matrizen in der Darstellung (6.53). Das ECR-Filter hat nun die Systemdarstellung

$$\begin{aligned} \underline{\chi}_{m+1}^{(r)} &= \underline{A}_r \underline{\chi}_m^{(r)} + \underline{b}_r p_{m+1} \\ q_{ECR,m+1} &= \underline{c}_r \underline{\chi}_{m+1}^{(r)} + d_r p_{m+1}. \end{aligned} \quad (6.54)$$

In Matlab wurden zwei Funktionen (als *m-file*) für die Berechnung des ECR-Filters implementiert:

- Die Funktion `generateECRMatrices` erstellt aus den Parametern für die ECR-Filter (siehe Tabelle 6.1) und der Abtastzeit T_s die Systemmatrizen \underline{A}_r (4×4), \underline{b}_r (4×1), \underline{c}_r (1×4) und d_r (1×1).
- Mit der Funktion `calculateECROutputs` kann aus einer Eingangszeitfolge p_m unter Verwendung eines Anfangszustands $\underline{\chi}_0^{(r)}$ (4×1) und der ECR-Systemmatrizen die Ausgangszeitfolge $q_{ECR,m}$ sowie der zugehörige Endzustand $\underline{\chi}_M^{(r)}$ berechnet werden.

CTF-Filter

Für die Berechnung des CTF-Filters gelten ähnliche Betrachtungen wie für die Berechnung des ECR-Filters. Es existieren allerdings auch einige Unterschiede: zum Einen besitzt das CTF-Filter mehrere Kanäle $n = 1 \dots N$, was aber kein Problem darstellt, da diese unabhängig voneinander betrachtet werden können. Zum Anderen ist die Anzahl k der verketteten Filter pro Kanal höher und nicht festgeschrieben. Des Weiteren sind die verketteten Einzelfilter eines Kanals untereinander gleich. Auf Grund der Unterschiede ergibt sich ein etwas anderes Berechnungsmodell.

Analog zum ECR-Einzelfilter ergibt sich die Ausgangsgleichung des i -ten CTF-Einzelfilters im Kanal n aus Gleichung (6.44) zu

$$\begin{aligned} q_{m+1}^{(i,n)} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{a_n^2 + \omega_n^2}{\omega_n} \end{bmatrix} \underline{\chi}_{m+1}^{(i,n)} \\ &= \underline{c}_n \underline{\chi}_{m+1}^{(i,n)}. \end{aligned} \quad (6.55)$$

An der Ausgangsgleichung in (6.55) wird ein weiterer Unetrschied zwischen CTF- und ECR-Einzelfilter deutlich: Das CTF-Filter besitzt keinen Durchgriff, das heißt der, Eingangswert hat keinen Einfluss auf den Ausgangswert im selben Zeitschritt.

Wegen der angeführten Unterschiede zwischen ECR-Filter und CTF-Filter ist es für das CTF-Filter nicht sinnvoll, alle Systemmatrizen eines Kanals in einer Matrix zusammenzufassen. Man kann aber für die Einzelfilter in der Kette den Umweg über die Ausgangsgleichung einsparen und direkt den Einfluss des internen Zustands aus dem vorgeschalteten Filter berücksichtigen. Für den internen Zustand $\underline{\chi}_{m+1}^{(i,n)}$ eines Filter innerhalb der Kette, also alle Filter außer dem ersten im Kanal, gilt mit der Ausgangsgleichung (6.55)

$$\begin{aligned} \underline{\chi}_{m+1}^{(i,n)} &= \underline{A}_n \underline{\chi}_m^{(i,n)} + \underline{b}_n p_{m+1}^{(i,n)} \\ &= \underline{A}_n \underline{\chi}_m^{(i,n)} + \underline{b}_n \underline{c}_n \underline{\chi}_{m+1}^{(i-1,n)} \\ &= \underline{A}_n \underline{\chi}_m^{(i,n)} + \begin{bmatrix} (\underline{b}_n)_1 \\ (\underline{b}_n)_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{a_n^2 + \omega_n^2}{\omega_n} \end{bmatrix} \underline{\chi}_{m+1}^{(i-1,n)} \\ &= \underline{A}_n \underline{\chi}_m^{(i,n)} + \frac{a_n^2 + \omega_n^2}{\omega_n} \underline{b}_n \left(\underline{\chi}_{m+1}^{(i-1,n)} \right)_2 \\ &= \underline{A}_n \underline{\chi}_m^{(i,n)} + \underline{b}'_n \left(\underline{\chi}_{m+1}^{(i-1,n)} \right)_2. \end{aligned} \quad (6.56)$$

Für die Berechnung eines CTF-Kanals n müssen also die Matrizen \underline{A}_n , \underline{b}_n , \underline{b}'_n und \underline{c}_n bestimmt werden. Zweckmäßigerweise werden alle Kanalmatrizen in Supermatrizen zusammengefasst, da dies das Parametermanagement und die Parameterübergabe bei der Implementierung wesentlich vereinfacht:

$$\begin{aligned} \underline{A} &= [\underline{A}_1, \underline{A}_2, \dots, \underline{A}_n] \\ \underline{b} &= [\underline{b}_1, \underline{b}_2, \dots, \underline{b}_n] \\ \underline{b}' &= [\underline{b}'_1, \underline{b}'_2, \dots, \underline{b}'_n] \\ \underline{c} &= [\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_n] \end{aligned} \quad (6.57)$$

Für die internen Zustände aller Filter im Zeitschritt m wird ebenfalls eine zusammenfas-

sende Matrix erstellt. Sie hat die Form

$$\underline{\chi}_m = \begin{bmatrix} \underline{\chi}_m^{(1,1)} & \underline{\chi}_m^{(1,2)} & \cdots & \underline{\chi}_m^{(1,N)} \\ \underline{\chi}_m^{(2,1)} & \underline{\chi}_m^{(2,2)} & \cdots & \underline{\chi}_m^{(2,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{\chi}_m^{(k,1)} & \underline{\chi}_m^{(k,2)} & \cdots & \underline{\chi}_m^{(k,N)} \end{bmatrix}. \quad (6.58)$$

Für die Dimensionierung, Parameterbestimmung und Ausgangsberechnung des gesamten CTF-Filters wurden in Matlab einige Funktionen implementiert:

- Die Funktion `calculatePETScale` implementiert den, in Abbildung 6.2 skizzierten, Dimensionierungsalgorithmus. Als Parameter werden ein Frequenzintervall $[f_{min}, f_{max}]$, die Anzahl der zu bestimmenden Kanäle N , die Anzahl der verketteten Einzelfilter pro Kanal k sowie die Referenzüberhöhung L_r erwartet. Zusätzlich kann noch ein optionaler Parameter δ für die Ergebnisgenauigkeit spezifiziert werden. Wird kein δ angegeben, ist die Ergebnisgenauigkeit intern zu $\delta := 1\%$ definiert. Die Funktion gibt einen Vektor mit den bestimmten charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$ sowie das ermittelte Überlappungsmaß ε zurück.
- Mit Hilfe der Funktion `calcCTFParams` können aus den charakteristischen Frequenzen $f_{C,n}$, der Anzahl der verketteten Einzelfilter pro Kanal k und der Referenzüberhöhung L_r die Dämpfungskonstanten a_n und die Eigenkreisfrequenzen ω_n berechnet werden. Dabei kommen die Gleichungen (6.20), (6.9) und (6.21) zum Einsatz.
- Aus dem Parametersatz (a_n, ω_n) , der Anzahl der verketteten Einzelfilter k und der Abtastzeit T_s ermittelt die Funktion `generateCTFMatrices2` die Supermatrizen für die CTF-Kanäle nach Gleichung (6.57).
- Die Funktion `calculateCTFOutputs2` berechnet aus der Eingangszeitfolge $p_{CTF,m}$, dem Anfangszustand $\underline{\chi}_0$ und den Supermatrizen nach Gleichung (6.57) die Kanalausgangszeitfolgen und einen neuen Zustand $\underline{\chi}_M$. Die Gestalt der Zustandsmatrizen ist aus Gleichung (6.58) ersichtlich. Die Ausgangszeitfolgen der Kanäle sind in einer Matrix mit der folgenden Gestalt zusammengefasst, wobei $q_m^{(i)}$ den Ausgangswert des i -ten Filterkanals im Zeitschritt m bezeichnet:

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} q_1^{(1)} & q_1^{(2)} & \cdots & q_1^{(N)} \\ q_2^{(1)} & q_2^{(2)} & \cdots & q_2^{(N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_M^{(1)} & q_M^{(2)} & \cdots & q_M^{(N)} \end{bmatrix} \quad (6.59)$$

6.2.4 Psychoakustische Erregung

Die psychoakustische Erregung lässt sich in zwei einfachen Schritten berechnen:

1. Von der Funktion `calculateRMS` werden die Effektivwerte der CTF-Ausgänge berechnet. Diese Funktion bestimmt aus einer Zeitfolge q_m die Zeitfolge der Effektivwerte \tilde{q}_m . Zur Bestimmung der Effektivwerte wird der Funktion als Parameter die Anzahl

n_{RMS} der Werte, über die gemittelt werden soll, übergeben. Bei der Effektivwertbildung nach (6.45) ergibt sich eine um $n_{RMS} - 1$ kürzere Zeitfolge. Dies kann mit einem optionalen Parameter verhindert werden. Wird der Parameter auf 1 gesetzt, so fügt die Funktion vor der eigentlichen Berechnung am Anfang der Zeitfolge $n_{RMS} - 1$ Nullen ein (*zero-padding*). Bei der späteren Berechnung von psychoakustischen Parametern erscheint dies zweckmäßig, da die Effektivwerte zum Beginn der Berechnung dann keine großen Sprünge aufweisen.

- Die Funktion `calculateExcitation` führt die Erregungsberechnung nach Gleichung (6.46) durch. Die Parameter κ , σ und ρ_n gehen dabei nach der geschilderten Formel in die Berechnung ein. Zusätzlich muss noch die Referenzüberhöhung L_r angegeben werden. Die Effektivwerte werden als Matrix $\underline{\tilde{q}}$ nach Gleichung (6.59) übergeben. Als Ergebnis werden die Werte der psychoakustischen Erregung \underline{e} ebenfalls als Matrix verfügbar.

Lautheit

Die instantane und zeitbewertete Lautheit lassen sich nach den Gleichungen (6.15) und (6.48) durch Summation berechnen. Die Implementierung in `calculateLoudness` gestaltet sich dementsprechend einfach. Die Funktion erwartet eine Matrix \underline{e} der psychoakustischen Erregung und die Anzahl n_N der Werte, welche in die Berechnung der zeitbewerteten Lautheit eingehen sollen. Analog zu der Implementierung der psychoakustischen Erregung kann auch hier durch einen optionalen Parameter das Einfügen von Nullen vor der Berechnung der zeitbewerteten Lautheit spezifiziert werden.

Als Ergebniswert der Funktion wird eine Zeitfolge $N_{i,m}$ von Werten der instantanen Lautheit und eine Zeitfolge N_m von Werten der zeitbewerteten Lautheit zurückgegeben.

6.2.5 Kalibrierung der Lautheit

Zur Überprüfung der implementierten Lösung wurde ein PET-System konfiguriert, automatisch dimensioniert und im Anschluss die Lautheit kalibriert. An Hand von mehreren weiteren analysierten Lautheitswerten kann dann die prinzipielle Funktion des Systems bewertet werden.

Die Lautheitswerte müssen so kalibriert werden, dass einem Sinuston mit der Frequenz 1 kHz und einem Schallpegel 40 dB die Lautheit 1 sone zugeordnet wird. Dieses Verhalten kann durch die Variation des Parameters ρ_n in der Berechnung der psychoakustischen Erregung (siehe (6.46)) erzeugt werden. Der Einfachheit halber wurde die Annahme getroffen, dass der Parameter ρ_n für alle Kanäle gleich ist ($\rho_n \rightarrow \rho$). Außer dem Parameter ρ können noch die Parameter σ und κ verwendet werden, um die Analyseergebnisse mit Ergebnissen aus Hörversuchen in Einklang zu bringen.

In Abbildung 6.4 zeigt die durchgezogene Linie die mit

$$R = \begin{cases} \rho_R \left(\frac{S_A}{\sigma-1} \right)^\kappa \left[\left(\frac{S(\sigma-1)}{S_A} + 1 \right)^\kappa - \sigma^\kappa \right] & , S \geq S_A \\ 0 & , S < S_A \end{cases} \quad (6.60)$$

berechneten Werte für die Lautheit N eines Sinustons mit der Frequenz 1 kHz . Die Werte für $\sigma = 1,12$ und $\kappa = 0,3$ wurden aus Terhardt (1998) entnommen. Als Stimulus S wurde

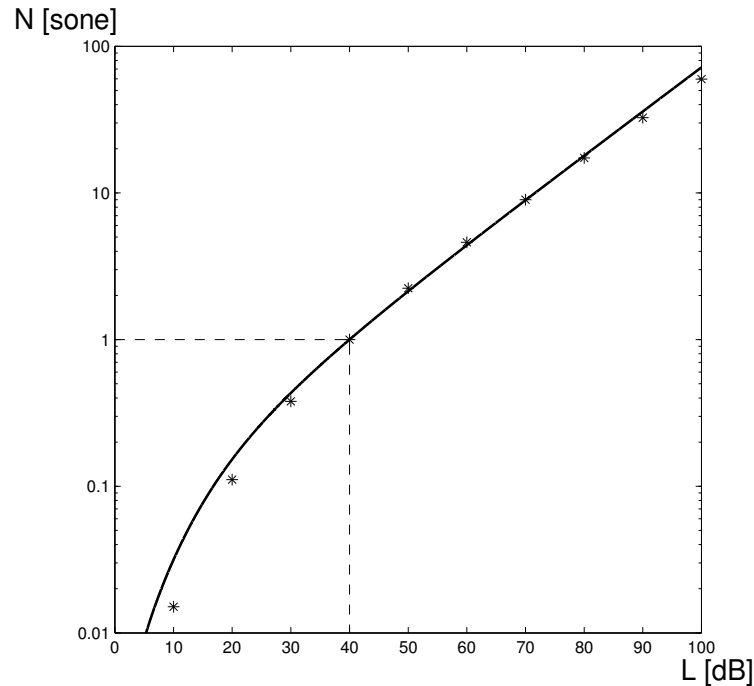


Abbildung 6.4: Lautheit N eines Sinustons mit der Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$

die Schallintensität gewählt, die Absolutschwelle liegt bei $S_A = 2 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Die Konstante ρ_R wurde so berechnet, dass sich für einen Schallpegel von 40 dB ein Lautheitswert von $N = 1 \text{ sone}$ ergibt.

Analysiert man mit dem PET-System nun ein berechnetes Testsignal, kann das System so kalibriert werden, dass sich für die Ausgangswerte des PET-Systems ein Verlauf nach Abbildung 6.4 ergibt. Als Signal wurde ein Sinuston mit der Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ gewählt. Da der Schallpegel eines Signals $p(t)$ durch

$$L = 20 \lg \frac{\tilde{p}}{p_r} \text{ dB} \quad (6.61)$$

mit dem Referenzschalldruck $p_r = 20 \mu\text{Pa}$ definiert ist und für den Effektivwert eines Sinussignals

$$\tilde{p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{p} \quad (6.62)$$

gilt, kann man für die Berechnung der Amplitude \hat{p} in Abhängigkeit vom Schallpegel L die folgende Vorschrift angeben:

$$\hat{p} = \sqrt{2} p_r 10^{\frac{L}{20 \text{ dB}}} \quad (6.63)$$

Für eine Bestimmung von ρ bzw. ρ_n in (6.46) wird ein Schallpegel von $L = 40 \text{ dB}$ gewählt und das PET-System mit dem Eingangssignal

$$p_m = \hat{p} \sin(2\pi f m T_s) \quad (6.64)$$

beaufschlagt. Der Kehrwert des Betrags, welchen die Lautheit N_m im eingeschwungenen Zustand annimmt, kann nun als Kalibrierkonstante verwendet werden.

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse einer Lautheitsanalyse mit einem kalibrierten PET-System durch Sterne gekennzeichnet. Das verwendete System wurde wie folgt parametrisiert:

- Die Systemabtastzeit beträgt $T_s = \frac{1}{44100} s$ (CD-Qualität). Die Gesamtdauer des Signals nach (6.64) beträgt $T = 0,125 s$. Innerhalb dieser Zeit sind alle Einschwingvorgänge abgeklungen und das PET-System kann als quasistationär betrachtet werden. Die betrachteten Signalpegel liegen bei 10, 20, ... 100 dB.
- Für das ECR-Filter wurden die Werte aus Tabelle 6.1 verwendet.
- Das CTF-Filter besitzt $N = 25$ Kanäle mit je $k = 5$ verketteten Einzelfiltern. Die charakteristischen Frequenzen der Kanäle liegen im Intervall $[25 Hz, 15 kHz]$. Als Referenzüberhöhung wurde $L_r = 70 dB$ angesetzt.
- Für die Effektivwertbildung wurde eine Zeitkonstante von $T_{RMS} = 25 ms$ bzw. eine entsprechende Anzahl n_{RMS} gewählt. Die Parameter $\sigma = 1,12$ und $\kappa = 0,45$ wurden gegenüber 6.1.3 leicht modifiziert, um den Kurvenverlauf in Abbildung 6.4 besser zu approximieren. Bei der Kalibrierung ergab sich ein Wert von $\rho \approx 0,752$.
- Für die Berechnung der zeitbewerteten Lautheit wurde eine Zeitkonstante $T_N = 40 ms$ bzw. eine entsprechende Konstante n_N verwendet. Dargestellt ist an jedem Pegelstützpunkt der Wert der zeitbewerteten Lautheit (6.48) im eingeschwungenen Zustand.

In Abbildung 6.4 erkennt man eine relativ gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Kalibrierkurve und den Werten aus dem PET-System. Für den Schallpegel 40 dB ergibt sich auf Grund der Kalibrierung eine genaue Übereinstimmung. Der Verlauf der Werte aus dem PET-System lässt sich durch Optimierung der Parameter σ und κ unter Umständen noch besser an die Werte der Kalibrierkurve annähern. Dadurch wird die prinzipielle Anwendbarkeit des Systems für die psychophysikalische Analyse an dieser Stelle gezeigt. Durch die vorgenommene Art der Implementierung ist das System auch ohne Weiteres als kompiliertes Modul außerhalb von Matlab verwendbar, zur automatisierten Umsetzung können hier in Matlab enthaltene Werkzeuge verwendet werden.

6.3 Zusammenfassung zum psychophysikalischen Modell

Das so implementierte Modell ist nun natürlich zunächst für die Verwendung als psychophysikalisches Modell geeignet, kann allerdings auch im angeführten Modell für die Haptikanalyse bei der Ermittlung haptischer Eigenschaften zum Einsatz kommen. Dazu müssen zunächst die Anzahl der Kanäle reduziert werden und eine Dimensionierung entsprechend der sensorischen Kapazitäten der menschlichen taktilen Wahrnehmung vorgenommen werden. Im Anschluss können dann Kraftverläufe und auch komplexere Zusammenhänge zwischen auftretenden Kräften und Wegen analysiert werden.

Der Vorteil des Modells der gewählten Darstellung liegt nun in der Berechenbarkeit auf einem Digitalrechner, welche keine weiteren Anpassungen oder besonders leistungsfähige Hardware benötigen würde. Dies vereinfacht die weitere Entwicklung und bildet so einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird die Notwendigkeit für die Haptikanalyse von Benutzerschnittstellen motiviert und dabei die verschiedenen Facetten der Haptik beleuchtet. Als Benutzerschnittstellen werden dabei komplexere Zusammenstellungen von Bedienelementen betrachtet, deren haptische Eigenschaften als Gesamtheit wiederum von den haptischen Eigenschaften der einzelnen Bedienelemente abhängen. Der Begriff der Haptik wird eingeführt und mit einigen gängigen und genormten Begrifflichkeiten für die Verwendung im Rahmen der Arbeit definiert. Die Einteilung der haptischen Eigenschaften in die Oberflächeneigenschaft der Textur und der äußeren haptischen Gestalt geht aus der Recherche hervor, im Rahmen der Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit werden allerdings noch die *dynamischen haptischen Eigenschaften* in zwei Klassen unterteilt.

Nach einem kurzen Überblick über die Haptikanalyse und die Methoden der Psychophysik werden die technischen Kenngrößen des menschlichen taktilen und kinästhetischen Sinnes, sowie die Bewegungsmöglichkeiten als Grundlage für die Dimensionierung eines Systems zur Haptikanalyse vorgestellt. Da bei der Betrachtung des Standes der Forschung auffiel, dass die bisher angewandten Methodiken bei der Haptikanalyse nicht ausreichend für eine die Schaffung einer Verbindung von technischen Messgrößen und menschlichen Empfindungen geeignet sind, wird mit dem Framework für die Haptikanalyse eine neue Vorgehensweise motiviert und vorgestellt. Diese kombiniert die gewonnenen Erkenntnisse der bisherigen Forschungsansätze zu einem Vorgehen, welches auf der einen Seite die Messtechnik und auf der anderen Seite die menschliche haptische Interaktion mit einer Benutzerschnittstelle oder ihren Teilen gleichberechtigt parallel durchführt. Auf diese Weise sollen sowohl die menschliche Interaktion beobachtet werden, die Ergebnisse der menschlichen Wahrnehmung erhalten bleiben als auch eine technische Vermessung der Bedienelemente ermöglicht werden.

An Hand der vorgestellten Methodik werden im Folgenden die Komponenten eines Haptikanalysesystems für Schalter als einfache Bedienelemente entwickelt. Die Auswahl der verwendeten Komponenten wird detailliert erläutert und die Entscheidung für bestimmte Messprinzipien der einzelnen Größen durch eine Abwägung von Vorteilen und Nachteilen für die Haptikanalyse getroffen. Die ausgewählten Komponenten werden in einem Messsystem für den menschlichen Test zusammengeführt, ein technisches Messsystem wird ebenso beschrieben und die Komponentenauswahl detailliert dargestellt.

Ein wichtiger Teil der vorgestellten Arbeit ist die Entwicklung eines Softwaresystems für Messsysteme mit geringer Rechenleistung und Speicherumfang, wobei unter Echtzeitbe-

dingungen Daten aus unterschiedlichen Sensorsystemen und unterschiedlichen System-schnittstellen sicher ausgelesen und gespeichert werden müssen. Das vorgestellte *Ticket Server*-System bietet bei einer sehr hohen, zur Laufzeit veränderbaren, Konfigurierbarkeit eine hohe Verarbeitungsleistung für die Messaufgaben und erlaubt auch ohne den Einsatz von (Echtzeit-)Betriebssystemen die effiziente Verarbeitung von nebenläufigen Kommunikations- und Messaufgaben. Durch seinen modularen Aufbau in verschiedenen Schichten der Hardwareabstraktion kann das gesamte Softwaresystem auf verschiedenen Plattformen mit einem geringen Anpassungsaufwand implementiert werden. Das vorgestellte Softwaresystem wurde im Rahmen der Arbeit auch implementiert und erfolgreich auf der Mikrocontrollerplattform für das mobile Messsystem und auf dem Messrechner verwendet.

Für die psychophysikalische Analyse von Signalen wird des Weiteren ein Modell der menschlichen Wahrnehmung berechnet und in eine effiziente Implementierung auf einem Messrechner überführt. Die Funktionsfähigkeit des Analysemodells wird mit berechneten Daten für die Wahrnehmung der psychophysikalischen Lautheit demonstriert.

Mit dem Abschluss der Arbeit liegt also eine Entwurfsmethodik für Haptikanalysesysteme, die Bedienelemente von Benutzerschnittstellen untersuchen, vor, ebenso können die vorgestellten und implementierten Messsysteme für die Untersuchung von Schalterprüflingen verwendet werden. Durch die Implementierung eines psychophysikalischen Modells steht auch eine Möglichkeit der Signalanalyse, die sich an der menschlichen Wahrnehmung orientiert, zur Verfügung.

Die vorgestellten Arbeiten können als Grundlage für eine Vielzahl weiterer Untersuchungen in der Haptikanalyse aber auch in anderen Gebieten verwendet werden. So wäre die Untersuchung einer größeren Menge von Schalterprüflingen und die gleichzeitige Aufnahmen von Empfindungen einer repräsentativen Personengruppe im Rahmen einer Studie wünschenswert, da so fundierte Zusammenhänge zwischen gemessenen physikalischen Größen und menschlichen Empfindungen ermittelt werden könnten. Darauf aufbauend ist dann die Schließung der Entwicklungsschleife über die Haptiksynthese der nächste logische Schritt, der dann einen zielgerichteten Entwurf haptischer Eigenschaften für komplexe Benutzerschnittstellen möglich macht. Auch die Weiterentwicklung des Messsystems für den Einsatz an komplexeren Bedienelementen als Schaltern wären eine sehr lohnende Weiterentwicklung des Systems.

Neben der Weiterentwicklung und Nutzung des Gesamtsystems zur Haptikanalyse haben sich auch gerade bei der Softwareentwicklung Entwicklungsmöglichkeiten ergeben, welche den Betrieb und die Erfassung von Daten auf lose gekoppelten verteilten Systemen wesentlich voranbringen können. Die vorgestellten Strukturen für die Software auf dem Messsystem ist nämlich auch in der Lage, mehrere Systeme zu kaskadieren und zur Laufzeit Kommunikationsverbindungen herzustellen und zu lösen. Durch die Unabhängigkeit der verwendeten Aufgabenbeschreibungen (Tickets) im System ist ein Transfer von verschiedensten Aufgaben durch verteilte Systeme und die dynamische Zuweisung von Aufgaben in diesen Systemen möglich. Da die gesamte Softwarestruktur nur geringe Anforderungen an die verwendete Rechnerhardware stellt, können auch Anwendungen adressiert werden, die typischerweise mit Energiemangel konfrontiert sind oder auf denen kein Platz für komplexe Rechnerhardware vorhanden ist. Ein Einsatz in der Mikrorobotik oder Roboterschwärmen für die Exploration oder die Gewinnung von Messdaten ist denkbar, das System kann prinzipiell durch Implementierung weiterer PlugIns und Tickets schon in der vorliegenden Form für diverse Aufgaben verwendet werden.

Anhang A

Beschreibung der Schnittstellen des Softwaresystems

Funktion	Daten	Beschreibung
startTicketServer	Speicherzuweisung, Listenkonfiguration, Kommunikationsmodul	Initialisierung des Ticket Servers
stopTicketServer	-	Beenden des Ticket Servers
createTicket	zugehörige Ticket Service Function, Ticket-Konfiguration	weitergeleitete Schnittstelle zum Ticket Processor
deleteTicket	Ticket-ID	explizite externe Löschung eines Tickets
getSystemTime	-	ermittelt die aktuelle Systemzeit und gibt diese zurück
storeMeasurementData	Zeitstempel, Sensor ID, Datenpaket	legt die übergebenen Daten im Messwertspeicher ab
retrieveMeasurementData	Filtermodus, Filterkriterien	holt Daten aus dem Messwertspeicher gibt diese (ggf. gefiltert) zurück
sendData	Datenpaket	versendet Daten über das Kommunikationsmodul
receiveData	-	empfängt Daten über das Kommunikationsmodul

Tabelle A.1: Schnittstellenfunktionen des Ticket Servers

A. Beschreibung der Schnittstellen des Softwaresystems

Funktion	Daten	Beschreibung
startTicketProcessor	Zugriff auf Speicher	Initialisierung des Ticket Processors
stopTicketProcessor	-	Beenden des Ticket Processors
cycleTicketProcessor	Speicherzugriff, Zeitstempel	zyklischer Aufruf des Ticket Processors (siehe 5.4.3)
registerProtocol	Protokoll PlugIn, Konfigurationsdaten	Registrierung eines neuen Protokolls und Schnittstellenweiterleitung an das Protokoll PlugIn
unregisterProtocol	Protocol-ID	Beendigung des angegebenen Protokolls und Schnittstellenweiterleitung an das Protokoll PlugIn
registerSensor	Sensor-ID, Protokoll-ID, Konfigurationsdaten	Registrierung eines Sensors an einem gegebenen Protokoll und Schnittstellenweiterleitung
unregisterSensor	Sensor-ID	Deregistrierung eines aktiven Sensors und Schnittstellenweiterleitung an das Protokoll PlugIn
createTicket	zugehörige Ticket Service Function, Ticket-Konfiguration	erstellt ein neues Ticket mit den angegebenen Informationen
deleteTicket	Ticket-ID	explizite externe Löschung eines Tickets
configureSensor	Sensor-ID, Konfigurationsdaten	Sensorkonfiguration über Schnittstellenweiterleitung
getSensorConfiguration	Sensor-ID	Ermittlung der Sensorkonfiguration über Schnittstellenweiterleitung
triggerSensor	Sensor-ID	Start des Messvorgangs auf einem Sensor über das Protokoll PlugIn
querySensorDataReady	Sensor-ID	Abfrage des Sensorstatus bei der Datenerfassung über das Protokoll PlugIn
getSensorData	Sensor-ID	Auslesen von Messdaten aus dem Sensor über das Protokoll PlugIn
getTimeStamp		Ermittlung des aktuellen Systemzeitstempels

Tabelle A.2: Schnittstellenfunktionen des Ticket Processors

Funktion	Daten	Beschreibung
serviceTicket	Ticket-Daten, Zeitstempel, Datenpaket	zentraler Aufrufpunkt für alle Ticket-Funktionen
deleteTicketRequest	Ticket-Daten	Signalisierung der externen Löschung des Tickets

Tabelle A.3: Schnittstellenfunktionen der Ticket Service Function

Funktion	Daten	Beschreibung
startProtocol	Konfigurationsdaten	Initialisierung des Protokolls im Rahmen der Protokollregistrierung des Ticket Processors
stopProtocol	Protocol Control Block	Beenden des Protokolls
cycleProtocol	Protocol Control Block	zyklischer Aufruf des Protokolls zur Abwicklung von Funktionen
registerSensor	Sensor-ID, Konfigurationsdaten	Registrierung eines neuen Sensors beim Protokoll PlugIn
unregisterSensor	Sensor-ID	Beenden der Verbindung zu einem aktiven Sensor
triggerSensor	Sensor-ID	Start des Messvorgangs auf einem Sensor
getSensorData	Sensor-ID	Auslesen von Messdaten aus dem Sensor
querySensorDataReady	Sensor-ID	Abfrage des Sensorstatus bei der Datenerfassung
configureSensor	Sensor-ID, Konfigurationsdaten	Konfiguration eines angeschlossenen Sensors
getSensorConfiguration	Sensor-ID	Ermittlung der Sensorkonfiguration

Tabelle A.4: Schnittstellenfunktionen des Protokoll PlugIns

A. Beschreibung der Schnittstellen des Softwaresystems

Element	Datentyp	Beschreibung
TicketID	integer number	eindeutige Identifikationsnummer des Tickets
TicketServiceFunction	function handle	Referenz auf die zugeordnete Ticket Service Function
Status	integer number	Statusfeld des Tickets mit einer Aufteilung in vordefinierte Konstanten und ticketspezifische Statuscodes
ActivationField	integer number	Speicherstelle für Zusatzinformationen bei zeit- oder ereignisgesteuerter Aktivierung
TicketData	variable size memory	zugeordneter Speicher zur freien Verwendung durch die Ticket Service Function

Tabelle A.5: Datenstruktur des Tickets

Element	Datentyp	Beschreibung
ProtocolID	integer number	eindeutige Identifikationsnummer des Protokoll PlugIns
ProtocolPlugin	function handle structure	Struktur mit den Referenzen des Schnittstellenfunktionen
registeredSensors	integer vector	Liste mit den Identifikationsnummern der registrierten Sensoren
Status	integer number	Statuscode des Protokoll PlugIns mit Aufteilung in vordefinierte Konstanten und protokollspezifische Statuscodes
ProtocolData	variable size memory	zugeordneter Speicher zur freien Verwendung durch das Protokoll PlugIn

Tabelle A.6: Datenstruktur des Protocol Control Blocks

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der haptische Sinn in seinen Einzelsinnen	11
2.1	Der WHaT (Wireless Haptic Texture Sensor) nach Pai and Rizun (2003)	17
2.2	Ein <i>haptic profile</i> nach D.Weir et al. (2004)	18
3.1	Kategorisierung der Charakteristik haptischer Rezeptoren	24
4.1	Systemstruktur des Frameworks für die Haptikanalyse	34
5.1	Indirekte Kraftmessung mit verschiedenen Aufbauten	45
5.2	Integrierte taktile Aufnehmer	47
5.3	Aufbau eines Folienkraftsensors (FSR)	48
5.4	Struktureller Aufbau des Messsystems	58
5.5	Fingeraufsatz und Platine für die Signalverarbeitung	58
5.6	Elektrischer linearer Direktantrieb ML D-100K	62
5.7	Modulares Konzept der Software zur Datenerfassung	65
5.8	Daten- und Steuerfluss im Ticket Server System	73
5.9	Schematische Darstellung des Kontrollflusses im Ticket Processor	74
5.10	Schematische Darstellung des Ablaufs in einem Konfigurations-Ticket	76
5.11	Schematische Darstellung des Ablaufs in einem Ticket für eine Einzelmessung	77
5.12	Schematische Darstellung des Ablaufs in einem Ticket für Mehrfachmessungen	79
5.13	Bluetooth-Protokollstapel	84
5.14	Skizze des Aufbaus für die Vermessung des Betätigungswegs	88
5.15	Typisches Bild bei der Vermessung (Finger und Schalter markiert)	89
5.16	Bestimmung der Pixelgröße mit einem Test-Target	90
5.17	Markierung und Veränderung der Region of Interest	90
5.18	Ablauf der Bildverarbeitungsanwendung bei der Evaluierung	91
5.19	Messabweichungen des Bildverarbeitungssystems bei rampenförmiger Trajektorie	92
5.20	Messabweichungen des Bildverarbeitungssystems bei rampenförmiger Trajektorie	93
5.21	Kraft-Weg-Kennlinie (Kraft in $[N]$, Position in $[m]$)	94
5.22	Mehrdimensionale Kraft-Weg-Zeit-Kennlinie (Kraft in $[N]$, Weg in $[m]$, Zeit in $[s]$)	94
6.1	Struktur des Peripheral Ear Transducer (PET)	96
6.2	Algorithmus für die Dimensionierung der CTF	102

6.3	Struktur und Signale beim ECR-Filter	109
6.4	Lautheit N eines Sinustons mit der Frequenz $f = 1 kHz$	113

Tabellenverzeichnis

3.1	Aktivierungsfrequenzen von taktilen Rezeptoren (nach R.Schmidt (2001)) . . .	25
3.2	Kennwerte der haptischen Wahrnehmung	26
3.3	Kennwerte Ausgabefähigkeit der menschlichen Hand	27
5.1	Vergleich von Kraftmessprinzipien für die Haptikanalyse	50
5.2	Vergleich von Positionsmessprinzipien für die Haptikanalyse	55
5.3	Technische Daten des Lineardirektantriebs M LD 100K	61
5.4	Latenz bei der Datenübertragung mit Bluetooth	85
5.5	Ergebnisse bei der Evaluierung des Bildverarbeitungssystems	92
6.1	Parameterwerte für die ECR-Filter	100
A.1	Schnittstellenfunktionen des Ticket Servers	117
A.2	Schnittstellenfunktionen des Ticket Processors	118
A.3	Schnittstellenfunktionen der Ticket Service Function	119
A.4	Schnittstellenfunktionen des Protokoll PlugIns	119
A.5	Datenstruktur des Tickets	120
A.6	Datenstruktur des Protocol Control Blocks	120

Literaturverzeichnis

- D. Braun, I. Tchouchenkov, and H. Wörn. A biological oriented measurement system for haptic testing. *Proceedings of the 9th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'07), Ufa, Russia, 2007*. Zitiert auf S. 35
- D. Braun, Tchouchenkov I., and Wörn H. A Framework for Analysis and Design of Haptic Interfaces. *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008a*. Zitiert auf S. 34
- D. Braun, I. Tchouchenkov, and H. Wörn. Development and implementation of a psychophysical model for the analysis of haptic properties. *Proceedings of the 10th International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT'2008, 2008b*. Zitiert auf S. 95
- S. Choi and H. Z. Tan. Toward realistic rendering of haptic textures. *IEEE Computer Graphics and Applications Special Issue - Haptic Rendering Beyond Visual Computing*, pages 40–47, 2004. Zitiert auf S. 16
- D. Weir, M. Peshkin, J. Colgate, P. Buttolo, J. Rankin, and M. Johnston. The haptic profile: Capturing the feel of switches. *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS04)*, pages 186–193, 2004. Zitiert auf S. 18 and 121ff
- Gustav Theodor Fechner. *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel, Leipzig, 1860. Teil 1 und 2 in einem Bd. Zitiert auf S. 21
- V. Hayward and K. E. MacLean. Do it yourself haptics - part i. *IEEE Robotics and Automation Society Magazine*, vol. 14:4, pages 88–104, 2007. Zitiert auf S. 16
- Thorsten Alexander Kern. *Entwicklung Haptischer Geräte : Ein Einstieg für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-87644-1. In: Springer-Online. Zitiert auf S. 10, 12, 24, 26, 27, and 29ff
- Uwe Kiencke. *Signale und Systeme*. Oldenbourg, 1998. ISBN 3-486-24165-6. Zitiert auf S. 107
- Katherine J. Kuchenbecker. Haptography: Capturing the feel of real objects to enable authentic haptic rendering. *HAS '08, 2008*. Zitiert auf S. 17
- Katherine J. Kuchenbecker, Joseph Romano, and William McMahn. Haptography: Capturing and recreating the rich feel of real surfaces. *International Symposium on Robotics Research. Lucerne, Switzerland, 2009*. Zitiert auf S. 17

- K. E. MacLean. The haptic camera: A technique for characterizing and playing back haptic environments. *Proc. of the 5th Ann. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, ASME/IMECE*, pages 459–468, 1996. Zitiert auf S. 16
- D. K. Pai and P. Rizun. The what: a wireless haptic texture sensor. *11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings.*, pages 3–9, 2003. Zitiert auf S. 17 and 121ff
- Christopher Richard. *ON THE IDENTIFICATION AND HAPTIC DISPLAY OF FRICTION*. PhD thesis, Stanford University, 2000. Zitiert auf S. 16
- R.Schmidt. *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer, 4., überarb. u. aktualisierte aufl. edition, 2001. Zitiert auf S. 25 and 123ff
- Ernst Terhardt. *Akustische Kommunikation*. Springer, 1998. ISBN 3-540-63408-8. Zitiert auf S. 23, 96, 97, 98, 99, 103, 104, 106, and 112ff
- V. Patoglu und R. Brent Gillespie. The haptic probe: Mechanized haptic exploration and automated modeling. *HAPTICS '03 Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'03)*, page 117, 2003. Zitiert auf S. 16
- V.Hayward, O.Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant, and G.Robles-De-La-Torre. *Haptic interfaces and devices*, volume 24, pages 16–29. Emerald Group Publishing Limited, 2004. Zitiert auf S. 8
- Karsten Weiß. *Ein ortsauflösendes taktiles Sensorsystem für Mehrfinger-Greifer*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, 2006. Zitiert auf S. 47